

## FORSCHUNGSBERICHT

Nr. 9104/6713

Entwicklung eines rechnerischen Nachweisverfahrens  
für das Brandverhalten von Mauerwerk

im Auftrag des  
Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau  
Deichmanns Aue 31 - 37, 53179 Bonn  
Az.: B I 5 - 80 01 93 - 11

Dipl.-Ing. Christiane Hahn  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser  
Dr.-Ing. Ekkehard Richter

15. Juni 1996

BIBLIOTHEK  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-38106 Braunschweig

Das Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau gemäß o.a. Förderungskennzeichen gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt bei den Autoren.

Der Forschungsbericht umfaßt 179 Blatt und 5 Anlagen.

	Seite
<b>INHALT</b>	
1 Einleitung	1.1
1.1 Anlaß und Auftrag	1.1
1.2 Aufgabenstellung	1.2
1.3 Organisation des Berichtes	1.3
2 Bisheriger Stand der Erkenntnisse zur Berechnung des Tragverhaltens von Mauerwerk	2.1
2.1 Allgemeines	2.1
2.2 Grundlagen für ingenieurmäßige Nachweise bei Normaltemperatur	2.3
2.2.1 Allgemeines	2.3
2.2.2 Druckfestigkeit von Mauerwerk	2.3
2.2.3 Zugfestigkeit von Mauerwerk	2.6
2.2.4 Schubfestigkeit von Mauerwerk	2.9
2.2.5 Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Mauerwerk	2.9
2.2.6 Weitere bauphysikalische Grundlagen	2.13
2.3 Grundlagen für ingenieurmäßige Nachweise bei Brandbeanspruchung	2.17
2.3.1 Allgemeines	2.17
2.3.2 Vorliegende Erfahrungen zum Brand- verhalten von Mauerwerk	2.18
2.3.3 Grundlagen der brandschutztechnischen Beurteilung von Mauerwerk nach DIN 4102 Teil 4	2.25
2.3.4 Fehlende Informationen zur systema- tischen Bewertung von Mauerwerk	2.28
2.4 Schlußfolgerungen, Einflußparameter	2.29

3	Thermische Materialeigenschaften unter Hochtemperaturbeanspruchung	3.1
3.1	Allgemeines zu den Temperatureigenschaften	3.1
3.2	Grundlagen der Wärmeentwicklung durch Brand	3.2
3.3	Zusammenfassung vorliegender Erkenntnisse	3.3
4	Mechanische Materialeigenschaften unter Hochtemperaturbeanspruchung der Einzelbaustoffe	4.1
4.1	Allgemeines zu den mechanischen Material- eigenschaften	4.1
4.2	Untersuchungsmethoden zur Bestimmung des Hochtemperaturverhaltens	4.2
4.2.1	$\sigma$ - $\epsilon$ Versuche	4.4
4.2.2	Thermische Dehnung $\epsilon_{th}$ und Gesamt- dehnungen $\epsilon_w$ (sog. Warmkriechversuche)	4.5
4.3	Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung der Materialeigenschaften unter Hochtemperaturbeanspruchung	4.6
4.3.1	Steine	4.6
4.3.1.1	Untersuchungsergebnisse und Bewertung Porenbeton	4.6
4.3.1.2	Untersuchungsergebnisse und Bewertung Kalksandstein	4.9
4.3.1.3	Untersuchungsergebnisse und Bewertung Leichtbeton	4.12
4.3.1.4	Untersuchungsergebnisse und Bewertung Mauerziegel	4.15
4.3.2	Mörtel	4.18
4.3.2.1	Untersuchungsergebnisse und Bewertung Leichtmörtel	4.18
4.3.2.2	Untersuchungsergebnisse und Bewertung Normalmörtel	4.20
4.3.2.3	Bewertung von Dünnbettmörtel	4.22

4.4	Vergleichende Betrachtungen, Schlußfolgerungen, Wertung	4.22
4.4.1	Vergleichende Betrachtungen	4.22
4.4.2	Schlußfolgerungen und Wertung	4.25
5	Mauerwerksabschnitte unter Hochtemperaturbeanspruchung	5.1
5.1	Allgemeines	5.1
5.2	Durchgeführte Untersuchungen	5.2
5.2.1	Thermische Dehnung $\epsilon_{th}$	5.2
5.2.2	Gesamtdehnungen $\epsilon_s$ (sog. Warmkriechversuche)	5.3
5.3	Untersuchungsergebnisse und Bewertung	5.3
5.3.1	Mauerwerksabschnitte aus Porenbeton	5.3
5.3.2	Mauerwerksabschnitte aus Kalksandstein	5.7
5.3.3	Mauerwerksabschnitte aus Leichtbeton	5.12
5.3.4	Mauerwerksabschnitte aus Mauerziegel	5.14
5.4	Vergleichende Betrachtungen, Schlußfolgerungen, Wertung	5.19
5.4.1	Vergleichende Betrachtungen	5.19
5.4.2	Schlußfolgerungen und Wertung	5.23
6	Entwicklung eines allgemeinen rechnerischen Nachweisverfahrens zum Trag- und Verformungsverhalten von Mauerwerk unter Brandbeanspruchung	6.1
6.1	Thermische Analyse	6.1
6.1.1	Grundlagen	6.1
6.1.2	Problemstellung	6.4
6.1.3	Umsetzung der Materialgesetze in das Rechenverfahren	6.6
6.1.3.1	Thermische Analyse - Porenbeton	6.8
6.1.3.2	Thermische Analyse - Kalksandstein	6.11
6.1.3.3	Thermische Analyse - Leichtbeton	6.14
6.1.3.4	Thermische Analyse - Ziegel	6.17



6.1.4	Verifizierung	6.20
6.1.5	offene Probleme	6.22
6.2	Mechanische Analyse	6.23
6.2.1	Grundlagen	6.23
6.2.2	Problemstellung	6.26
6.2.3	Umsetzung der Materialgesetze in das Rechenverfahren	6.27
6.2.3.1	Allgemeine Grundlagen	6.27
6.2.3.2	Porenbeton	6.29
6.2.3.3	Kalksandstein	6.37
6.2.3.4	Leichtbeton	6.42
6.2.3.5	Ziegel	6.45
6.2.3.6	Leichtmörtel	6.47
6.2.4	Verifizierung	6.51
6.2.5	offene Probleme	6.52
7	Vereinfachtes Nachweisverfahren für Mauerwerk unter Hochtemperaturbeanspruchung	7.1
7.1	Grundlagen	7.1
7.2	Annahmen	7.2
7.3	Erläuterung des Verfahrens	7.4
7.3.1	Allgemeines	7.4
7.3.2	Porenbeton	7.8
7.3.3	Kalksandstein	7.13
7.3.4	Leichtbeton aus Bims	7.16
7.3.5	Ziegel	7.17
7.4	Verifizierung	7.18
7.5	offene Probleme	7.19
8	Zusammenfassung	8.1
8.1	Schlußfolgerungen und Bewertung der Rechenverfahren	8.1
8.1.1	Allgemeines	8.1

8.1.2	Allgemeines rechnerisches Nachweisverfahren	8.2
8.1.3	Vereinfachtes Rechenverfahren	8.3
8.2	Empfehlungen zur Umsetzung in die Praxis	8.4
Literatur [1] bis [27]		L.1
Normen und Richtlinien [N1] bis [N19]		N.1
Formelzeichen		F.1
Anlagenverzeichnis		A.1



## 1 EINLEITUNG

### 1.1 Anlaß und Auftrag

Das Brandverhalten von Mauerwerk wurde bisher sowohl in Deutschland als auch in Europa, Amerika und Australien ausschließlich durch Bauteilprüfungen an praxisgerechten Probekörpern bestimmt. In Deutschland wurden die Bauteilprüfungen an geschoßhohen Wänden und Pfeilern nach DIN 4102 Teil 2, Ausgabe 1977, durchgeführt. Die Prüfergebnisse weisen z.T. erhebliche Streubreiten auf, die sich durch die derzeitigen Prüfmethoden nicht klären lassen. In der Amtlichen Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig (MPA BS), liegen weltweit die meisten Prüferfahrungen zum Brandverhalten von Mauerwerk vor. Dieses beruht darauf, daß in Deutschland das unterschiedlichste und variantenreichste Mauerwerk verwendet wird.

Bis heute erfolgt die brandschutztechnische Bemessung von Mauerwerk ausschließlich auf der Grundlage der o. a. genormten Prüferfahrungen, wie sie im Abschnitt 4: Zusammenstellung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile der DIN 4102 Teil 4, Ausgabe 03/1994, für die praktische Anwendung aufbereitet sind. Es existiert weltweit bisher kein rechnerisches Bemessungsverfahren zum Nachweis des Brandverhaltens von Mauerwerk.

Im Rahmen der europäischen Harmonisierung wurde dieses Manko für den Bereich des Mauerwerksbaues wiederum sehr deutlich, weil für alle anderen Bauarten - Stahl- und Spannbeton, Stahl, Verbund und Holz - rechnerische Bemessungsverfahren vorliegen. Ohne ein rechnerisches Nachweisverfahren erwies es sich als unmöglich, die aus den verschiedenen Ländern vorliegenden Prüfergebnisse zu vergleichen und tabellenmäßig zusammenzufassen, da Grundlagen zu einer Bewertung der festgestellten Unterschiede fehlten. Also blieb nur die Addition der bisherigen nationalen Erfahrungen.

In mehreren Parallelvorhaben zu diesem Vorhaben wurden als erster Schritt Materialuntersuchungen zur Bestimmung des Hochtemperaturverhaltens der Einzelbaustoffe von Mauerwerk durchgeführt. Die experimentellen Ergebnisse dienen als Ausgangsbasis für die Erarbeitung von Rechengrundlagen für einen rechnerischen Nachweis des Brandverhaltens von Mauerwerk.

## 1.2 Aufgabenstellung

Dieses mit Vertrag vom 15.07.1993 beauftragte Forschungsvorhaben hat zum Ziel, für das Brandverhalten von Mauerwerk ein rechnerisches Nachweisverfahren zu entwickeln. Dabei sollen Materialeigenschaften der einzelnen Steinarten

- Porenbeton nach DIN 4165,
- Leichtbeton nach DIN 18151 und DIN 18152,
- Mauerziegel nach DIN 105,
- Kalksandsteine nach DIN 106

sowie der in der Praxis verwendeten Mörtelarten

- Normalmörtel \*),
- Leichtmörtel \*) und
- Dünnbettmörtel \*)

\*) jeweils nach DIN 1053 Teil 1

einbezogen und auch die Kombination von Stein und Mörtel realistisch berücksichtigt werden.

Die Aufgabenstellung umfaßt auch die Auswertung der vorliegenden Bauteil-Prüfergebnisse im Hinblick auf das Erwärmungsverhalten bei Brandbeanspruchung und die Ermittlung der dafür maßgebenden thermischen Materialkennwerte für die einzelnen Mauerwerksarten. Die für genauere mechanische Analysen bei Brandeinwirkung benötigten Spannungs-Dehnungslinien werden

auf der Basis der durchgeführten Hochtemperatur-Materialuntersuchungen erarbeitet. Als Hochtemperatur wird der Temperaturbereich von etwa 100 °C bis 1000 °C verstanden.

### 1.3 Organisation des Abschlußberichtes

Im vorliegenden Abschlußbericht werden zu nächst die wesentlichen Grundlagen zum Tragverhalten von Mauerwerk unter Normaltemperatur zusammengefaßt. Es werden die durchgeführten Auswertungen der Brandprüfungen an Bauteilen aus Mauerwerk vorgelegt. Alle in der Amtlichen Materialprüfanstalt Braunschweig vorliegenden Prüfzeugnisse zum Brandverhalten von Mauerwerk wurden dahingehend untersucht, inwieweit die Ergebnisse zur systematischen Untersuchungen herangezogen werden können und welche Ergebnisse sich, insbesondere hinsichtlich der Temperaturverteilung innerhalb der Bauteile und der Verformungen der Bauteile, ableiten lassen. Die Prüfzeugnisse behandeln im wesentlichen Normprüfungen, bei denen nicht unbedingt alle erforderlichen Messungen für eine systematischen Untersuchung durchgeführt werden müssen. Anschließend werden die in vier parallel laufenden Forschungsvorhaben ermittelten Ergebnisse zum Hochtemperaturverhalten der Einzelbaustoffe und von Mauerwerksabschnitten zusammengefaßt und bewertet.

Auf dieser Basis werden ein rechnerisches Nachweisverfahren entwickelt und bewertet. Die Verfahrensweise dafür wird dargelegt. Außerdem wird ein vereinfachtes Nachweisverfahren auf der Grundlage aller vorliegenden Daten erarbeitet und dargelegt. Abschließend werden Vorschläge zur Umsetzung in die Praxis vorgestellt.

Alle Zusammenfassungen und Wertungen werden im Bericht dargelegt. Einzelergebnisse und Details werden in den Anlagen zum Bericht zusammengefaßt, so daß alle Grundlagen für die Zusammenfassungen verfolgt werden können.

Aufgrund der sehr umfangreichen Datenfülle und der erstmaligen Entwicklung von rechnerischen Nachweisverfahren zum Brandverhalten von Mauerwerk konnten einige Punkte nicht vollständig abgearbeitet werden. Es war aber auch nicht beabsichtigt, alle mauerwerksspezifischen Eigenschaften im ersten Schritt zu lösen. In diesen Fällen wurden Begründungen und Hinweise zur weiteren Bearbeitung gegeben.

## 2 BISHERIGER STAND DER ERKENNTNISSE ZUR BERECHNUNG DES TRAGVERHALTENS VON MAUERWERK

### 2.1 Allgemeines

Mauerwerk ist eine historisch gewachsene Bauart, die sich im wesentlichen im Handwerk entwickelt hatte und auf Erfahrung beruhte.

Mauerwerk ist aber nicht gleich Mauerwerk und im Zeitalter des Wärmeschutzes auch durchaus nicht immer massiv. Es setzt sich aus Steinen und i. d. R. Mörtel zusammen. Die Steine können im wesentlichen vier verschiedenen Baustoffgruppen - Porenbeton, Leichtbeton, Ziegel und Kalksandstein - zugeordnet werden. Es sind Vollsteine und Lochsteine mit den verschiedensten Abmessungen, Rohdichten und Festigkeiten zu unterscheiden. Die Abmessungen Länge x Breite x Höhe beginnen bei  $l = 240 \text{ mm}$ ,  $b = 115 \text{ mm}$ ,  $h = 52 \text{ mm}$  (sogenannte Dünnformate DF) und enden bei  $l = 998 \text{ mm}$ ,  $b = 495 \text{ mm}$ ,  $h = 498 \text{ mm}$  (sogenannte Planelemente). Die Rohdichteklassen 0,35 bis 2,2, das entspricht  $0,31 \text{ kg/dm}^3$  bis  $2,50 \text{ kg/dm}^3$ , und die Festigkeitsklassen 2 bis 60, das entspricht  $2,0 \text{ N/mm}^2$  bis  $60,0 \text{ N/mm}^2$ , werden abgedeckt. Anzumerken ist hierzu, daß die tatsächlichen Rohdichte- und Festigkeitsklassen in Abhängigkeit vom jeweiligen Steinmaterial variieren, Porenbeton hat z. B. Rohdichteklassen von 0,35 bis 0,7 und Festigkeitsklassen von 2 bis 6 oder Kalksandstein Rohdichteklassen von 1,0 bis 2,2 und Festigkeitsklassen von 4 bis 60. Dies sind die in den entsprechenden Normen festgelegten Eckwerte, die aber nichts über den tatsächlich produzierten Bereich aussagen.

Die Mörtel sind im wesentlichen in drei Gruppen - Normalmörtel, Leichtmörtel und Dünnbettmörtel - einzuteilen. Die Mörtel unterscheiden sich durch die Zuschlagsart und die Fugendicke. Die Mörtel werden in DIN 1053 Teil 1 geregelt.

In der Tabelle 2.1 werden die einzelnen Stein- und Mörtelarten zusammengefaßt.



Material	Rohstoffe		Herstellungsprozesse	
	Zuschlag	Bindemittel		Härtung
Steine				
Kalksand- stein	Quarzsand	gebrannter Kalk	Druck- presse	Autoklave 160°C bis 220°C 4-8 Std.
Leichtbeton	Bims, Lava, Blähton	Zement	Gießen	Hydraul. Abbinden
Porenbeton	gemahlener Quarzsand	Branntkalk, Zement, Treibmittel	Gießen, Treiben	Autoklave 190°C, 12 bar 6-12 Std.
Ziegel	Ton	Zement	Druck- presse	Brennver- fahren 800°C bis 1200°C
Mörtel				
Normalmörtel MG II, IIa MG III, IIIa	Sand	Zement, Kalk	8 - 15 mm	Hydraul. Abbinden
Leichtmörtel LM 21, LM 36	Perlite, Blähglas	Zement	10 - 15 mm	
Dünnbett- mörtel	Sand, Korn $\leq$ 1 mm	Zement, Zusätze	1 - 3 mm	

Tabelle 2.1: Übersicht über die Stein- und Mörtelarten im Mauerwerksbau

## 2.2 Grundlagen für ingenieurmäßige Bemessung bei Normaltemperatur

### 2.2.1 Allgemeines

Der Nachweis der Tragfähigkeit von Mauerwerk bei Normaltemperatur erfolgte über Jahrzehnte nach Verfahren der DIN 1053 Teil 1 mit zulässigen Spannungen:

$$\sigma = F/A \text{ [N/mm}^2\text{]} \leq \text{zul } \sigma \quad (1)$$

mit  $F$  = Druckkraft [N]

$A$  = Fläche [mm<sup>2</sup>]

Die zulässige Druckspannung  $\text{zul } \sigma$  wurde einer Tabelle in Abhängigkeit von der Schlankheit entnommen, die auf langjährigen Erfahrungen beruhte. Außerdem waren bestimmte konstruktive Randbedingungen einzuhalten.

Mit dem Erscheinen der DIN 1053 Teil 2, Ausgabe 07/1984, wurde erstmals, relativ spät verglichen mit den übrigen Bauarten, ein ingenieurmäßiges Bemessungsverfahren für Mauerwerk bei Normaltemperatur vorgelegt.

Im folgenden werden die Grundlagen des Tragverhaltens von Mauerwerk kurz zusammengefaßt. Ausführliche Angaben können der zitierten Literatur entnommen werden.

### 2.2.2 Druckfestigkeit von Mauerwerk

Mauerwerk besteht aus einer Aneinanderreihung verschiedener Elemente - Steinschicht, Mörtelschicht, Steinschicht, etc. Die Tragfähigkeit einer Wand ergibt sich jedoch nicht nach dem Prinzip einer Kette, die soviel trägt wie ihr schwächstes Glied.

Vielmehr ist die mittlere Wandfestigkeit  $\beta_W$  maßgebend. In [2] ist der Mittelwert der Wandfestigkeit  $\beta_W$  als Mittel über alle Steinarten statistisch wie folgt abgeleitet:

$$\beta_W = 0,83 \cdot \beta_{St}^{0,66} \cdot \beta_{Mö}^{0,18} \quad (2)$$

mit  $\beta_{St}$  = Steinfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$\beta_{Mö}$  = Mörtelfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

Die Exponenten in Gleichung (2) variieren je nach Steinart erheblich. Es läßt sich aber deutlich aus dem Exponenten 0,18 von  $\beta_{Mö}$  erkennen, daß die Mörtelfestigkeit  $\beta_{Mö}$  nur einen geringen Einfluß auf die Wandfestigkeit hat.

Nach den heutigen Erkenntnissen wird der Bruchmechanismus von gedrücktem Mauerwerk nach Mann [1] wie folgt dargestellt. Das Druckversagen der Wand wird durch Zugversagen der Steine in Querrichtung, also durch ein Zerreißen der Steine eingeleitet, weil die Querdehnung des Mörtels im Regelfall nicht gleich, sondern größer als die Querdehnung der Steine ist. Aus Gründen der Verträglichkeit der Verformungen treten Schubspannungen zwischen Stein und Mörtel auf, die im Mörtel einen günstigen allseitigen Druckzustand und im Stein einen ungünstigen Querkzug erzeugen. Die Steine zerreißen zu einzelnen Säulen, die letztlich durch Ausknicken und Zerschlagen versagen. Im Bild 2.1 wird der Bruchmechanismus graphisch verdeutlicht.

Auch unvollständig vermörtelte Lagerfugen können einen ähnlichen Effekt erzeugen. Überträgt nämlich die Lagerfuge, wie in Bild 2.2 gezeigt, die Druckkräfte nicht vollständig bis zum Rand, so entstehen im Stein Spaltzugkräfte, die ebenfalls ein Spalten oder Abscherbeln der Steine bewirken können. Die nicht vollständig vermörtelte Lagerfuge kann wegen mangelhafter Ausführung, wegen Absetzen zu flüssigen Mörtels oder wegen stärkeren Schwindens der Randzone entstehen.

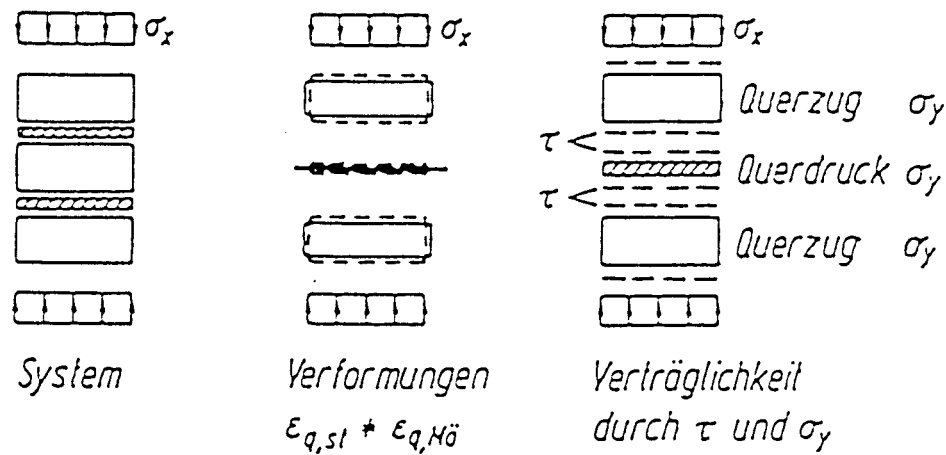


Bild 2.1: Bruchmechanismus von Mauerwerk [1]

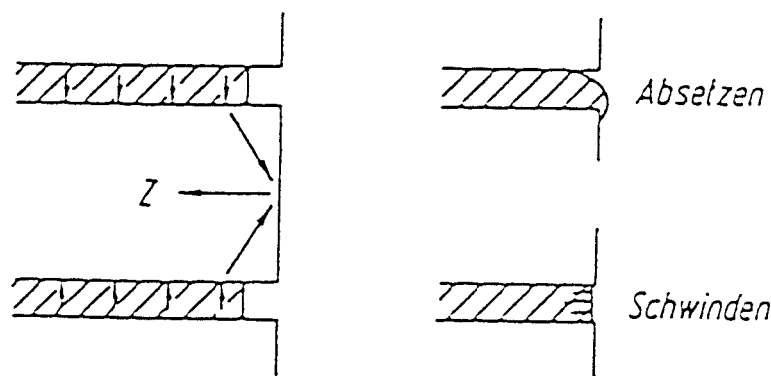


Bild 2.2: Spaltzugkräfte im Stein [1]

Aus dem geschilderten Bruchverhalten ergibt sich, daß die Druckfestigkeit der Steine nur einen von mehreren Faktoren für die Druckfestigkeit der Wand darstellt. Die Querkzugfestigkeit der Steine und damit das Verhältnis von Zug- zu Druckfestigkeit des Steinmaterials, das Lochbild, das Steinformat, die Mörtelart, die Mörteldicke und -qualität, etc. beeinflussen das Tragverhalten. Hieraus ergibt sich z. B. auch, daß Leichtmörtel, der üblicherweise eine größere Querdehnung aufweist als Normalmörtel, bei gleicher Druckfestigkeit eine geringere Wanddruckfestigkeit bewirkt. Es erklärt

auch die bekannte Tatsache, daß sich mit dünnen Fugen, z. B. mit Dünnbettmörtel, die Tragfähigkeit der Wand i. d. R. erheblich steigern läßt. Weitere Angaben hierzu sind in [1] enthalten.

### 2.2.3 Zugfestigkeit von Mauerwerk nach DIN 1052 Teil 2 [N3]

#### 2.2.3.1 Zugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge

Die Zugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zur Lagerfuge darf im Standsicherheitsnachweis für tragende Wände nicht angesetzt werden, da sie gering ist und nicht in allen Fällen gewährleistet werden kann.

#### 2.2.3.2 Zugfestigkeit parallel zur Lagerfuge

Der Verband des Mauerwerks und die Zugfestigkeit der Steine ermöglichen die Aufnahme von Zugspannungen parallel zur Lagerfuge. Von den folgenden Höchstwerten im Gebrauchszustand kann ausgegangen werden:

$$\text{zul } \sigma_z \leq \frac{1}{\gamma} (\beta_{Rk} + \mu \cdot \sigma_d) \cdot \frac{\ddot{u}}{h} \quad (3a)$$

$$\text{zul } \sigma_z \leq \frac{\beta_{Rz}}{2\gamma} \leq 0,3 \text{ N/mm}^2 \quad (3b)$$

Der kleinere Wert ist maßgebend.

Hierin bedeuten nach [N3]:

zul $\sigma_z$	=	zulässige Zugspannung parallel zur Lagerfuge im Gebrauchszustand
$\sigma_d$	=	gleichzeitig wirkende Druckspannung parallel zur Lagerfuge
$\beta_{Rz}$	=	Rechenwert der Steinzugfestigkeit nach Tabelle 2
$\beta_{Rk}$	=	Rechenwert der Kohäsion nach Tabelle 3, Kohäsion ist nur anzusetzen, wenn die Fuge nicht klafft.
$\mu$	=	Reibungsbeiwert = 0,6
$\ddot{u}/h$	=	Überbindemaß / Steinhöhe
$\gamma$	=	Sicherheitsbeiwert

Diesen Gleichungen liegen die Überlegungen zugrunde, daß die Zugfestigkeit der Wand parallel zur Lagerfuge aus zwei Gründen überschritten werden kann:

a) Versagen der Fuge:

Wird die Reibungskraft in den Lagerfugen überschritten, löst sich der Verband ohne Zerstörung der Steine zahnartig auf. Für diesen Versagensfall liefert die Gleichgewichtsbedingung  $\sum H = 0$  nach Bild 3:

$$2\tau \cdot \ddot{u} = \sigma_z \cdot 2h \quad (4a)$$

Mit der Reibungsgeraden  $\tau = \beta_{Rk} + \mu \cdot \sigma_d$  und dem Sicherheitsbeiwert  $\gamma$  folgt hieraus die Gl. (3a). Vorausgesetzt wird hierbei, wie auch bei der Ableitung der Schubfestigkeit, daß in den Stoßfugen keine Zugkraft von Stein zu Stein übertragen werden kann.

b) Versagen der Steine:

Wird die Reibungskraft in den Fugen nicht überschritten, erfolgt das Versagen durch Zerreißen der Steine. Nach Bild 2.3 lautet die Gleichgewichtsbedingung  $\Sigma H = 0$  :

$$h \cdot \beta_{Rz} = 2h \cdot \sigma_z \tag{4b}$$

Mit dem Sicherheitsbeiwert  $\gamma$  entsteht hieraus die Gl. (3b), in der der Höchstwert  $0,3 \text{ N/mm}^2$  eine empirisch festgelegte Obergrenze darstellt.

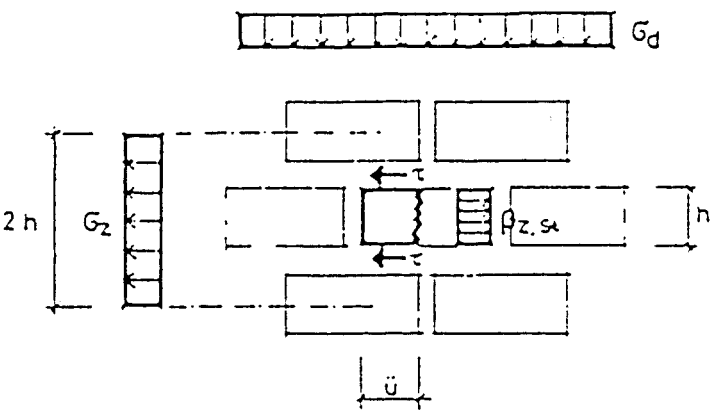


Bild 2.3: Zugbeanspruchung von Mauerwerk parallel zur Lagerfuge

	Hohlblocksteine	Hochlochziegel Lochsteine und Vollsteine mit Griffschlitz	Vollsteine ohne Griffschlitz
$\beta_{Rz}$	$0,025 \cdot \beta_{Nst}$	$0,033 \cdot \beta_{Nst}$	$0,04 \cdot \beta_{Nst}$

$\beta_{Nst}$  = Nennwert der Steindruckfestigkeit (Steindruckfestigkeitsklasse)

Tabelle 2.2: Rechenwerte der Steinzugfestigkeit  $\beta_{Rz}$  [N]

Mörtelgruppe	IIa	III	IIIa
$\beta_{Rk}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	0,18	0,22	0,25

Tabelle 2.3: Rechenwerte der Kohäsion  $\beta_{Rk}$  [N3]

2.2.4 Schubfestigkeit von Mauerwerk

Mauerwerk kann auf Schub in verschiedener Weise versagen. Bei geringer Auflast versagt die Mörtelfuge auf Reibung; bei höherer Auflast kann es vor dem Reibungsversagen der Fuge zu einem Abscheren der Steine, d. h. einem Reißen infolge schiefer Hauptzugspannungen kommen; bei sehr hoher Auflast versagt das Mauerwerk auf Druck bzw. auf schiefe Hauptdruckspannungen. Die Schubfestigkeit hängt somit sowohl von der aufnehmbaren Reibungskraft in der Mörtelfuge als auch von der Zugfestigkeit der Steine ab.

Diese Zusammenhänge sind u. a. ausführlich in [5] und [6] beschrieben, deshalb wird an dieser Stelle hierauf nicht weiter eingegangen.

2.2.5 Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Mauerwerk

Da in der europäischen Mauerwerksnorm, Eurocode 6, erstmalig für die Bemessung von Mauerwerk eine idealisierte Spannungs-Dehnungs-Linie ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) vorgegeben wurde und in Deutschland nur wenig Versuchsergebnisse zum Belastungs-Verformungsverhalten von Mauerwerk vorlagen, wurde 1989 das Forschungsvorhaben "Ermittlung von charakteristischen Spannungs-Dehnungs-Linien von Mauerwerk" [7] durchgeführt.

Das Versuchsprogramm sah im wesentlichen verformungsgeregelte, zentrische Druckversuche an Mauerwerks-Prüfkörpern vor.



Die Prüfkörper wurden aus in Deutschland für tragende Wände üblichen Stein- und Mörtelarten hergestellt. Es wurden Hochlochziegel, Kalksandsteine, Porenbeton und Leichtbeton (Zuschlag Naturbims) in Kombination mit Normalmörtel MG IIa, MG III oder Leichtmörtel oder Dünnbettmörtel untersucht.

Einzelheiten zu den Untersuchungsergebnissen sind nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens; sie können [7] entnommen werden. Im folgenden werden nur die charakteristischen Werte zusammengefaßt. In den Bilder 4 - 7 werden normierte  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien für die Steinarten Porenbeton, Kalksandstein, Leichtbeton und Hochlochziegel dargestellt.

Bei Porenbeton, Leichtbeton und Hochlochziegeln zeigt der ansteigende Ast der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien einen gestreckten parabelförmigen, bei Kalksandstein einen ausgerundeten parabelförmigen Verlauf. Die Dehnungen unter Höchstspannung betragen bei Porenbeton 2,7 mm/m (Normalmörtel) bzw. 3,7 mm/m (Dünnbettmörtel), bei Kalksandstein 1,9 mm/m (KSL) bzw. 3,1 mm/m (KS), bei Leichtbeton i.M. 1,2 mm/m und bei Hochlochziegeln zwischen 1,6 mm/m und 2,3 mm/m.

In [7] wird zusammenfassend festgestellt, daß die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien bei den in Deutschland verwendeten Mauerwerksarten sehr unterschiedlich sind und damit keine einheitliche, idealisierte  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie für alle Mauerwerksarten vorgeschlagen werden kann, u. a. aus Wirtschaftlichkeitsgründen. Vielmehr wurde empfohlen für die verschiedenen Mauerwerksarten  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien zu entwickeln, um die unterschiedliche Form der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien und die großen Unterschiede bei den Bruchdehnungen angemessen berücksichtigen zu können.

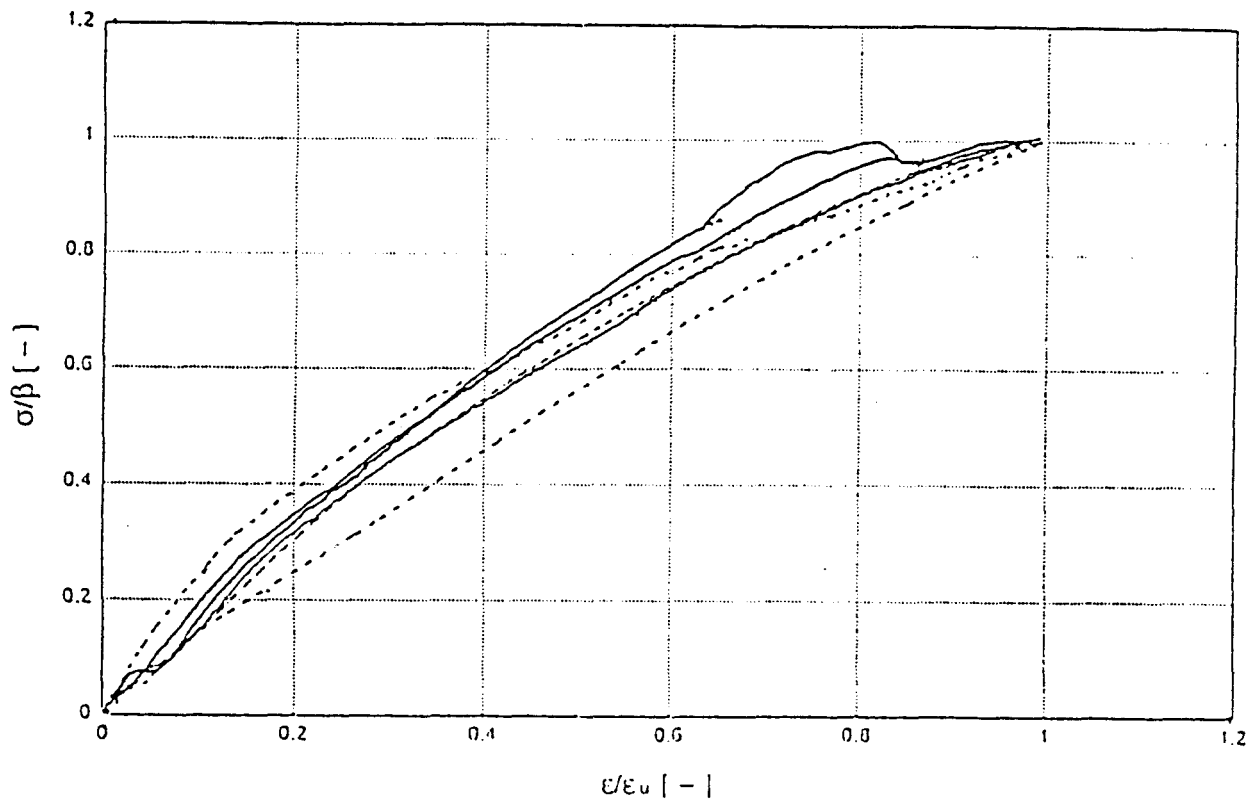


Bild 2.4: Normierte  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien für Porenbeton/Normalmörtel

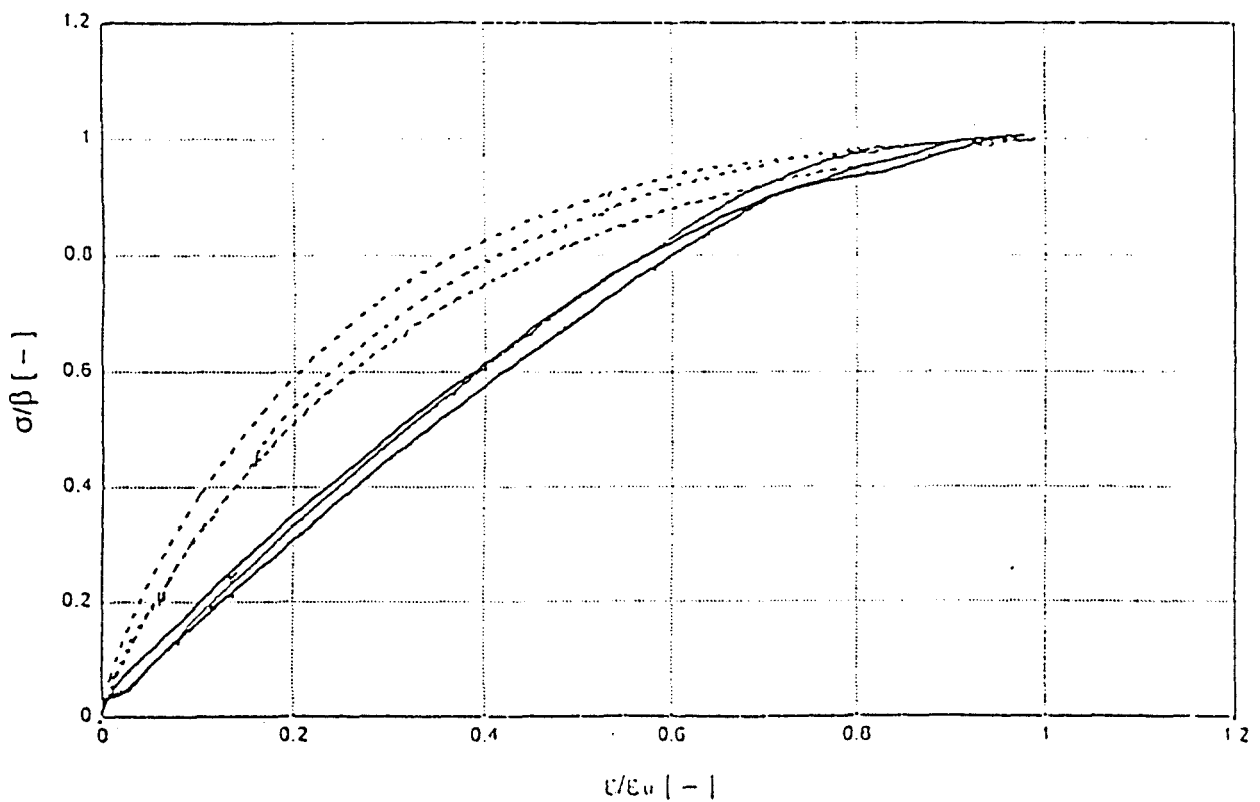


Bild 2.5: Normierte  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien für Kalksandstein/Normalmörtel

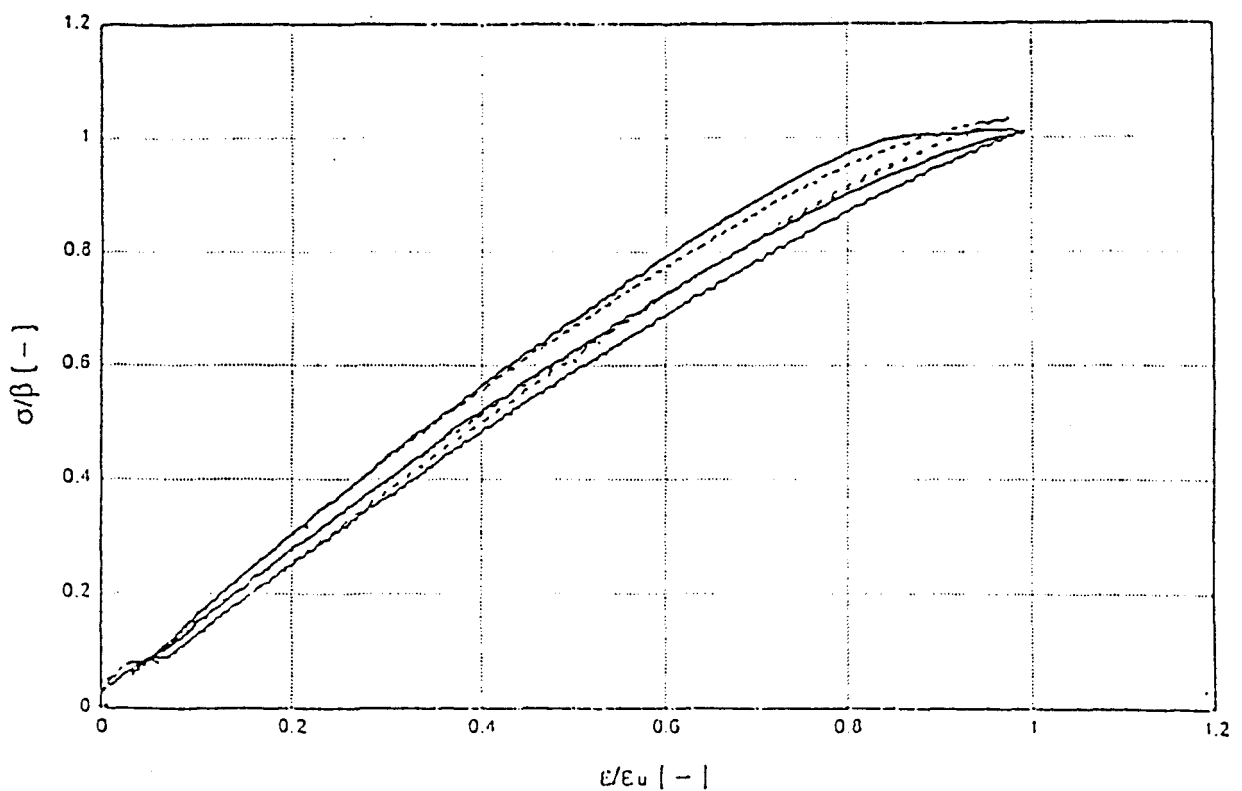


Bild 2.6: Normierte  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien für Leichtbeton/Normal- und Leichtmörtel

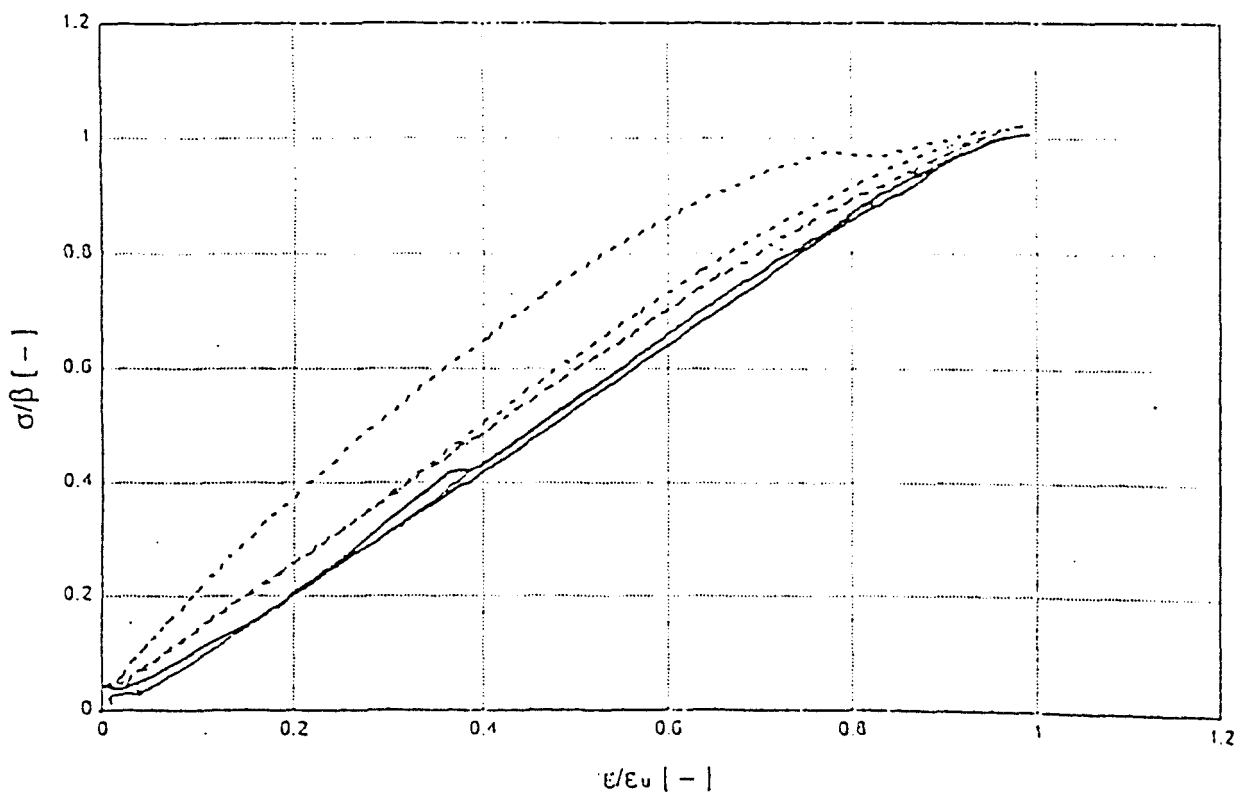


Bild 2.7: Normierte  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien für Hochlochziegel / Normalmörtel

In der gemäß Eurocode 6 vorgeschlagenen idealisierten  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie wurde der Wertebereich der Dehnungen bei Höchstspannung aller Mauerwerksarten eingetragen, vgl. Bild 2.8. Deutlich erkennbar ist der große Streubereich von Mauerwerk.

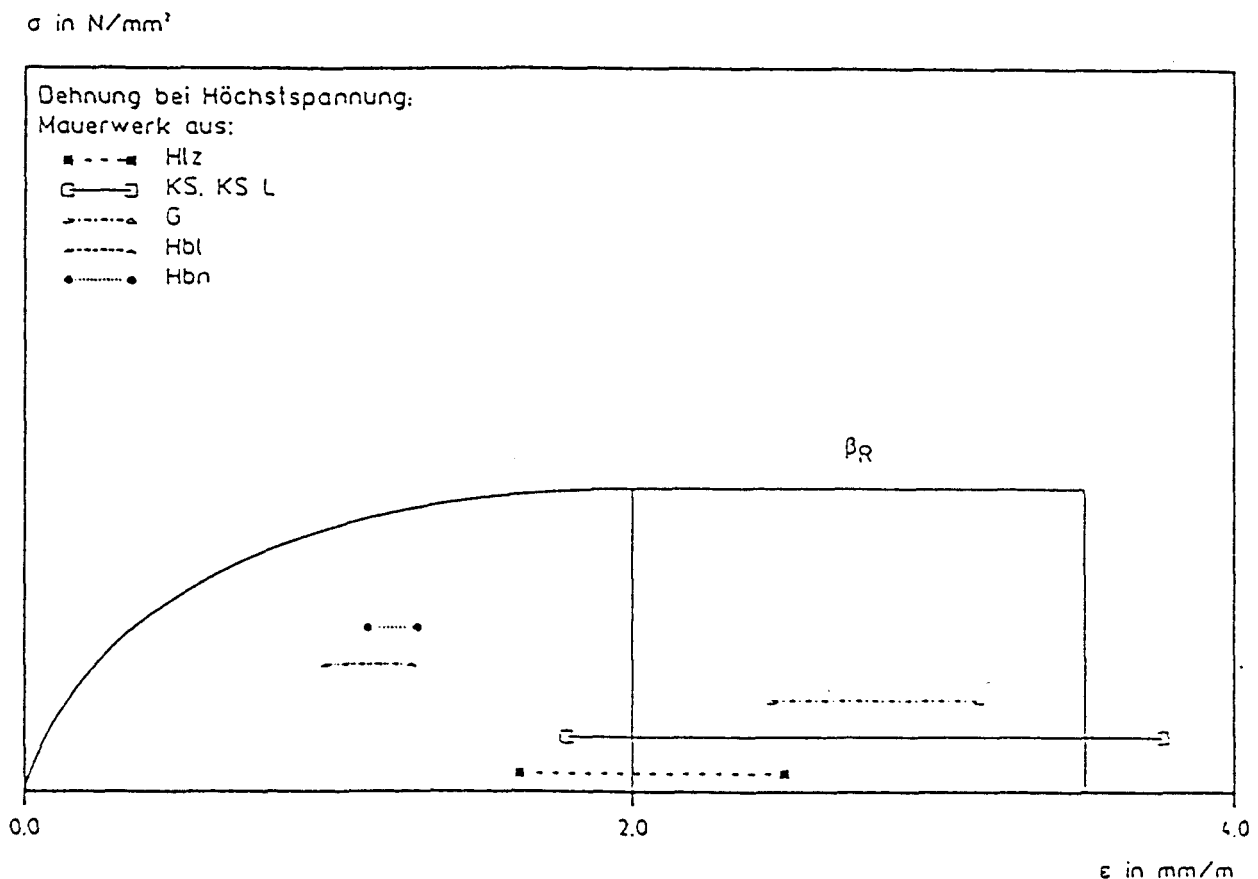


Bild 2.8: Idealisierte  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie gemäß [N1]

## 2.2.6 Weitere bauphysikalische Grundlagen

Im folgenden werden nur die bauphysikalischen Grundlagen zusammengefaßt, die auch für die brandschutztechnische Bemessung von Mauerwerk von Bedeutung sind.

#### 2.2.6.1 Rohdichte

Die Rohdichten der einzelnen Steinarten unterscheiden sich erheblich. Es werden, je nach Sorte, Rohdichten von  $350 \text{ kg/m}^3$  bis  $2200 \text{ kg/m}^3$  gefertigt. Gemäß den derzeitig gültigen Produktnormen [N5 bis N 10] gelten folgende Werte für die Rohdichten

- Porenbeton  $310 \text{ kg/m}^3$  bis  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,
- Kalksandstein  $510 \text{ kg/m}^3$  bis  $2200 \text{ kg/m}^3$ ,
- Leichtbeton  $410 \text{ kg/m}^3$  bis  $2000 \text{ kg/m}^3$ ,
- Normalbeton  $810 \text{ kg/m}^3$  bis  $2400 \text{ kg/m}^3$ ,
- Ziegel  $510 \text{ kg/m}^3$  bis  $2200 \text{ kg/m}^3$ .

Anzumerken ist, daß nicht alle Rohdichten produziert werden.

#### 2.2.6.2 Wärmeleitfähigkeit

Aufgrund der ständigen Verschärfung der Anforderungen an den Wärmeschutz liegen mittlerweile zahlreiche Untersuchungsergebnisse zur Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk bei Normaltemperatur vor. Auch hier werden wiederum die Unterschiede der einzelnen Mauerwerksarten deutlich. Die Wärmeleitfähigkeit hängt wesentlich vom tatsächlichen Feuchtegehalt ab. Dieses wird in zahlreichen Untersuchungen dargelegt, u.a. [8]. Brandschutztechnisch ist die Vereinbarung getroffen worden, daß im Brandfall im Bauwerk i. d. R. nur die Ausgleichsfeuchte und nicht die tatsächliche Feuchte zugrunde gelegt wird. Die Restfeuchte, die sich aus der Ausgleichsfeuchte ergibt, wird bei der rechnerischen Temperaturermittlung innerhalb des Bauteils berücksichtigt, vgl. Abschnitt 3.

Im folgenden wird beispielhaft nach [8] für jede Steinart die Wärmeleitfähigkeit dargestellt. Auch hier ist wiederum eine realtiv große Streubreite erkennbar.

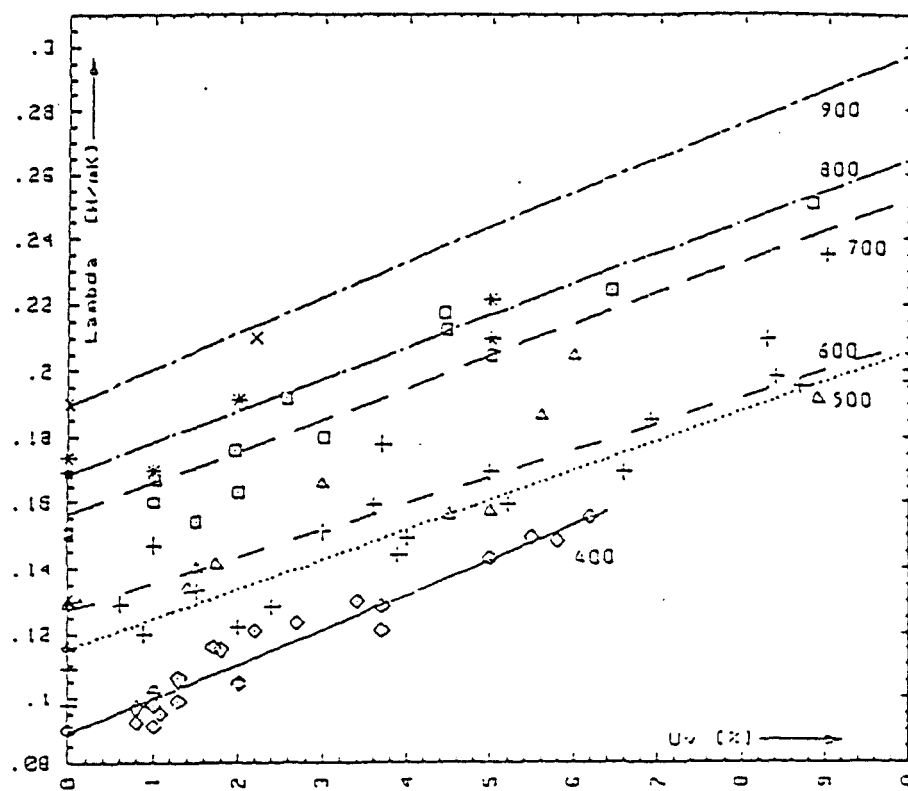


Bild 2.9: Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Rohdichte [8]

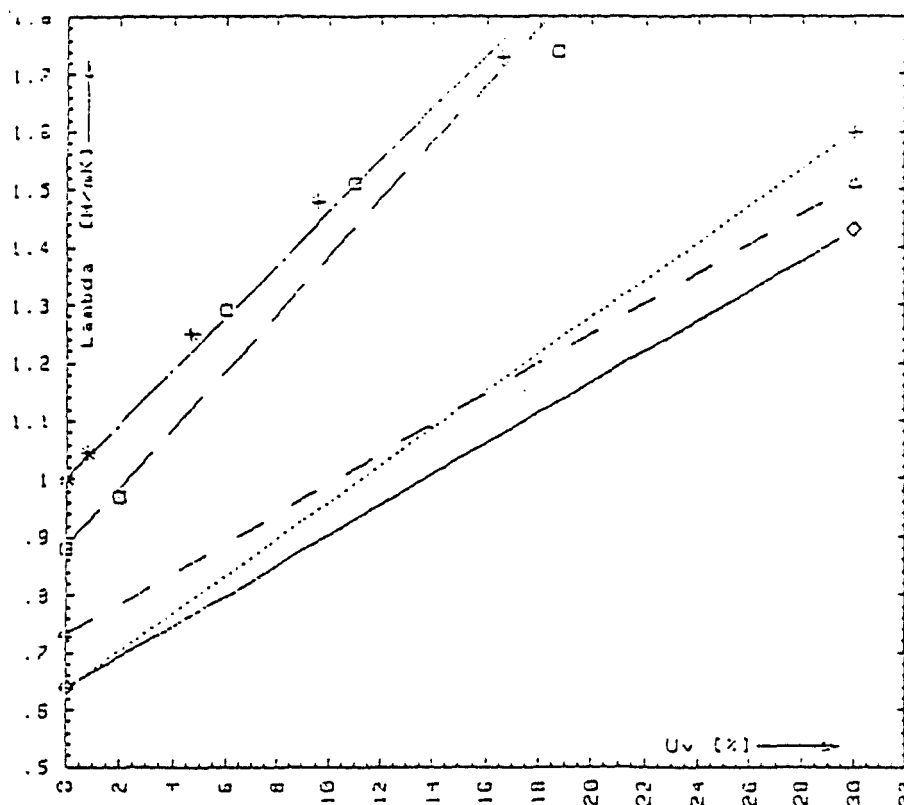


Bild 2.10: Wärmeleitfähigkeit von Kalksandstein in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Rohdichte [8]

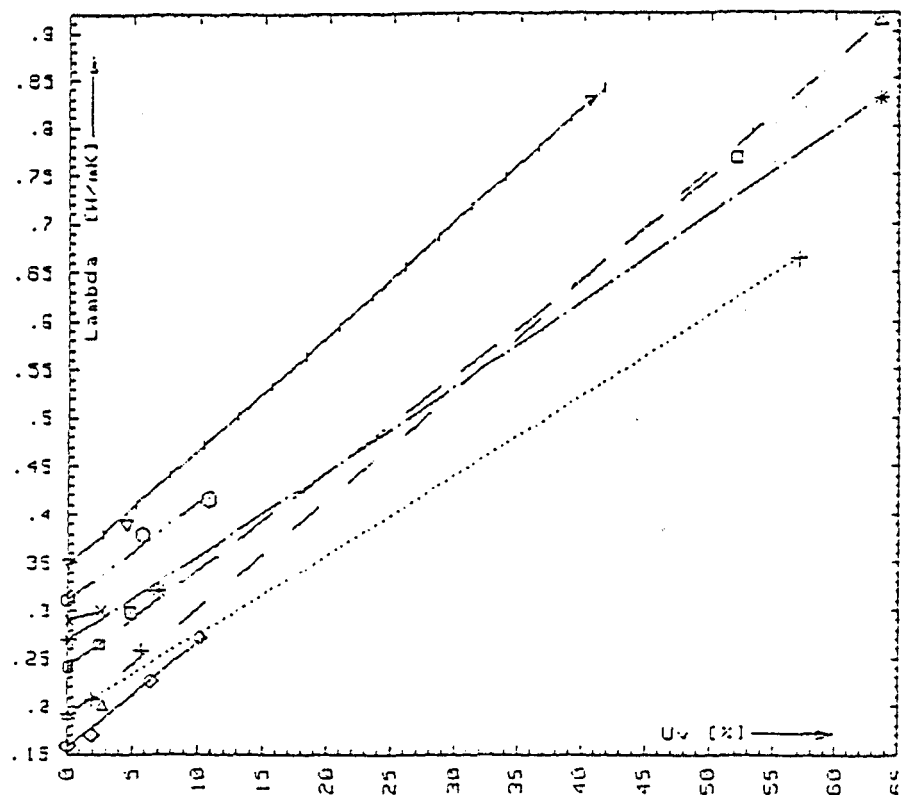


Bild 2.11: Wärmeleitfähigkeit von Leichtbeton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Rohdichte [8]

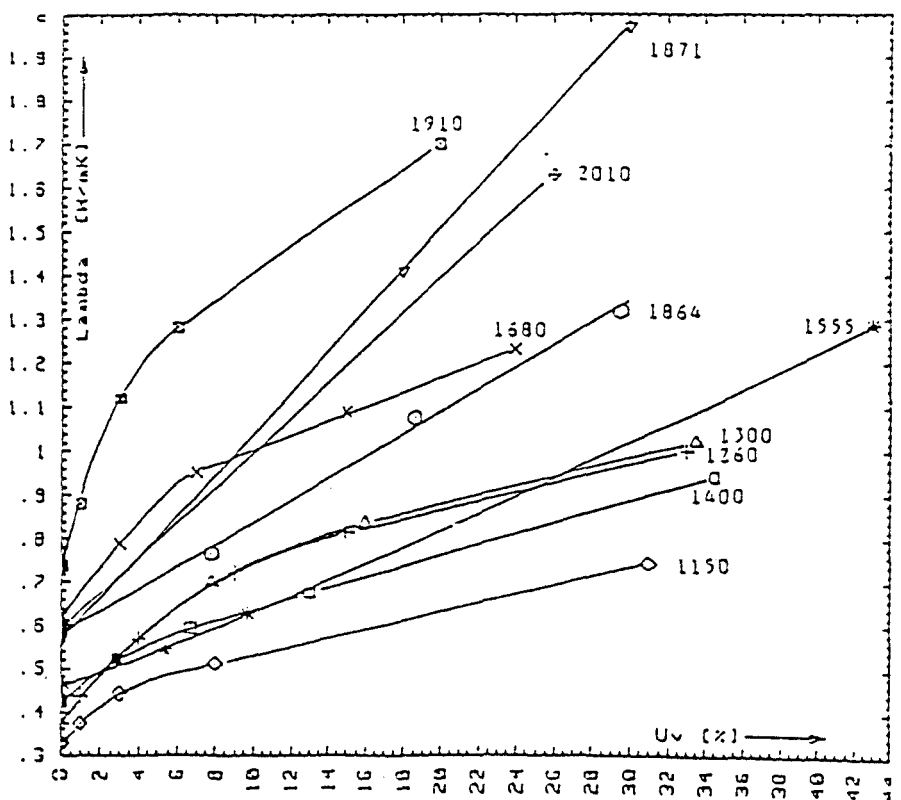


Bild 2.12: Wärmeleitfähigkeit von Ziegeln in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Rohdichte [8]

Als Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_R$  werden nach [11] in Abhängigkeit von der Rohdichte und Mörtelfuge die Werte gemäß Tabelle 2.4 vereinbart.

Mauerwerk aus	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_R$ [W/mK]
Porenbeton	0,15 bis 0,29
Kalksandstein	0,50 bis 1,30
Leichtbeton	0,20 bis 0,99
Ziegel	0,30 bis 1,20

Tabelle 2.4: Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_R$

2.3 Grundlagen für ingenieurmäßige Nachweise bei Brandbeanspruchung

2.3.1 Allgemeines

Das Brandverhalten eines Bauteiles wird u.a. durch die Lastausnutzung, das statische System und vor allem durch das thermische und das mechanische Materialverhalten unter Hochtemperaturbeanspruchung bestimmt. Für Beton-, Stahl- und Verbundkonstruktionen wurden u.a. im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 148 [9] und in mehreren Forschungsvorhaben im iBMB umfangreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten durchgeführt.

Für den Baustoff Normalbeton liegen umfangreiche Erkenntnisse über die Hochtemperatur-Materialeigenschaften vor, die auch für Mauersteine aus Normalbeton zugrunde gelegt werden können. Für Leichtbeton mit Blähton als Zuschlag existieren ebenfalls einige Materialdaten [10], die im vorliegenden Forschungsvorhaben übernommen werden.



Für Mauerwerk liegen weltweit keine vergleichbaren Ergebnisse vor. Hierzu trägt auch bei, daß die Materialeigenschaften der einzelnen Mauerwerksbaustoffe ganz verschieden sind, weil einerseits die Rohstoffzusammensetzungen variieren und sich andererseits die Herstellungsprozesse grundlegend unterscheiden, (vgl. Tabelle 2.1 und Abschnitt 2.2.)

Für Mauerwerk steht kein rechnerisches Nachweisverfahren für das Trag- und Verformungsverhalten zur Verfügung. Erste Überlegungen zur Entwicklung eines Rechenverfahren unter Verwendung eines Finite-Element-Verfahrens wurden im Rahmen der 10th IBMAC vorgestellt [11]. Hierbei wurde allerdings festgestellt, daß die theoretischen Überlegungen nicht weiter verfolgt werden können, weil die Eingangswerte - Materialeigenschaften von Mauerwerk unter Hochtemperaturbeanspruchung - fehlen.

Mauerwerk in Deutschland ist sehr unterschiedlich und vielfältig. Aufgrund der Wärmeschutz-Verordnung wurden sowohl die Steinarten als auch die Mörtelarten für Mauerwerk unter Normaltemperatur modifiziert und weiterentwickelt. Die vorliegenden Erkenntnisse zum Brandverhalten von Mauerwerk müssen daher jeweils an die Sorten und Bauarten gebunden werden. Die vorliegenden Erkenntnisse allgemein gültig auf Mauerwerk zu übertragen, sollte nur mit äußerster Zurückhaltung erfolgen. Die Gründe hierfür werden im folgenden Abschnitt erläutert.

#### 2.3.2 Vorliegende Erfahrungen zum Brandverhalten von Mauerwerk

Aus den 80er und 90er Jahren liegen zahlreiche Prüferfahrungen aus Bauteilprüfungen an Mauerwerkspfeilern und Mauerwerkswänden vor; weniger Ergebnisse liegen aus den 50er und 60er Jahren vor. Die Ergebnisse können den Prüfzeugnissen der einzelnen Steinindustrien oder -verbänden entnommen werden.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhaben und vorher zur Grundlagentermittlungen für die Überarbeitung von DIN 4102 Teil 4, Ausgabe 03/1994, wurden alle deutschen Prüfergebnisse zusammengetragen, soweit die Industrie dieses ermöglichte, und ausgewertet. Für DIN 4102 Teil 4 wurden im wesentlichen Feuerwiderstandsdauern hinsichtlich Tragfähigkeitsversagen und Temperaturüberschreitungen ermittelt. Für dieses Forschungsvorhaben wurden zusätzlich Temperatúrauswertungen vorgenommen und Randbedingungen der einzelnen Prüfungen hinsichtlich Mauerwerksart - Steine, Rohdichten, Festigkeiten - und Belastung - Auflagerbedingungen, Auslastungsfaktor, Lasteinleitung, etc. ermittelt und verglichen. Die untersuchten Prüfergebnisse sind in den Tabellen 1 - 5 der Anlage 1 zu diesem Forschungsbericht zusammengefaßt. Aus Wettbewerbsgründen wurden die Prüfzeugnis Nr. nicht aufgenommen, ebenso mußten einige Detailangaben entfallen, damit die Ergebnisse nicht zurückverfolgt werden können. Insgesamt wurden über 350 Prüfergebnisse aus den Jahren 1953 bis 1996, die im Rahmen von Bauteilprüfungen im Auftrag der Industrie ermittelt wurden, ausgewertet.

Im folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse und Prüferfahrungen für die einzelnen Mauerwerksarten zusammengefaßt dargestellt.

#### 2.3.2.1 Porenbetonsteine nach DIN 4165

Porenbetonsteine werden i. d. R. mit Normalmörtel oder Dünnbettmörtel eingesetzt. Bei Verwendung des Dünnbettmörtels werden hinsichtlich des Tragverhaltens höhere Feuerwiderstandsdauern erreicht als bei der Verwendung von Normalmörtel, s.a. Abschnitte 2.2 und 6.2.

Porenbeton reißt an der beflamnten Oberfläche netzartig und wird bei einer Brandbeanspruchung von etwa 90 min ca. 1,5 cm tief zermürbt. Das zermürbte Material läßt sich mit den Fin-

gern zerreiben. Die Struktur und Farbe des zermürbten Materials ist anders als die des ursprünglichen Materials.

Porenbeton dämmt aufgrund seiner hohen Wärmedämmeigenschaften sehr gut im Brandfall. Temperaturerhöhungen auf der feuerabgekehrten Seite sind minimal.

Bei nichttragenden, raumabschließenden, sehr dünnen Wänden ( $d < 100$  mm) tritt Versagen im Brandfall aufgrund zu großer Verformung ein. Dieses beruht auf der einseitigen Beflammung. 115 mm dicke geputzte bzw. 150 mm dicke ungeputzte Porenbetonwände erreichen bereits eine Feuerwiderstandsdauer von  $> 130$  Minuten.

Bei tragenden Porenbetonwänden hängen die Versagenszeitpunkte wesentlich von der Wanddicke und dem Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  [F] ab. Wobei festgehalten werden muß, daß bisher nur Rohdichteklassen  $\geq 0,5$ , d.h. Rohdichten  $\geq 410$  kg/m<sup>3</sup>, nachgewiesen wurden. Je geringer die Rohdichte und auch die Festigkeit der Steine wird, um so empfindlicher wird die Wand hinsichtlich Brandverhalten. Das kann dazu führen, daß geringere Feuerwiderstandszeiten erreicht werden, als es aufgrund der Wanddicke zu erwarten wäre. Erste Prüfungen in dieser Richtung bestätigen dieses.

#### 2.3.2.2 Leichtbetonsteine nach DIN 18151 und DIN 18152

Bei den Leichtbetonsteinen handelt es sich um Hohlblöcke und Vollsteine bzw. Vollblöcke mit Leichtzuschlägen gemäß DIN 4226 Teil 2. In der Regel wird Naturbims oder Blähton als Zuschlag verwendet. Das Gefüge ist haufwerksporig. Als Mörtel werden Normalmörtel oder auch Leichtmörtel eingesetzt.

Die Vollsteine können mit Schlitzten oder Grifföffnungen bis zu 10% der Lagerfläche gefertigt werden. Die Hohlblöcke (Lochsteine) können minimale Außenstegdicken von 30 mm und minimale Innenstegdicken von 25 mm haben. Es werden Einkammer- bis

Sechskammer-Hohlblocksteine gefertigt. Aufgrund der Zuschläge werden überwiegend Steine - Vollsteine bzw. Hohlblöcke - mit Dicken  $\geq 240$  mm gefertigt. Vereinzelt werden 175 mm und 115 mm dicke Steine geliefert.

Als minimale Dicke wurden bisher erst einmal 175 mm dicke Wände aus Hohlblöcken auf Brandverhalten geprüft, ansonsten wurden in der Vergangenheit nur dickere Wände, sowohl aus Hohlblöcken als auch aus Vollsteinen, untersucht.

Während der Brandbeanspruchung sind auf der beflamnten Oberfläche keine deutlichen Veränderungen erkennbar. Die Oberfläche wird lediglich heller. Unterschiede im Brandverhalten zwischen Vollsteinen und Hohlblöcken konnten bisher nicht festgestellt werden.

Leichtbeton dämmt ebenfalls aufgrund seiner hohen Wärmedämmeigenschaften sehr gut im Brandfall. Temperaturerhöhungen auf der feuerabgekehrten Seite sind minimal. Leichtbeton durchläuft eine lange Phase, in der Wasserdampf ausgetrieben wird. Durch das haufwerksporige Gefüge der Steine kann das Gefügewasser ohne Probleme austreten.

Bei nichttragenden, raumabschließenden Wänden kann das Versagen im Brandfall nur aufgrund zu großer Verformungen eintreten. 115 mm dicke geputzte bzw. 140 mm dicke ungeputzte Leichtbetonwände erreichen bereits eine Feuerwiderstandsdauer von  $> 180$  Minuten. Diese Werte wurden an bewehrten Wandplatten ermittelt und auf Mauerwerkswände übertragen.

Bei tragenden Leichtbetonwänden hängen die Versagenszeitpunkte wesentlich von der Wanddicke und dem Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  [F] ab. Wobei festgehalten werden muß, daß bisher nur Rohdichteklassen  $\geq 0,6$ , d.h. Rohdichten  $\geq 510$  kg/m<sup>3</sup>, nachgewiesen wurden. Je geringer die Rohdichte und auch die Festigkeit der Steine wird, um so empfindlicher wird die Wand hinsichtlich Brandverhalten. Das kann dazu führen, daß geringere Feu-

erwiderstandszeiten erreicht werden, als es aufgrund der Wanddicke zu erwarten wäre.

#### 2.3.2.3 Mauersteine aus Beton nach DIN 18153

Mauerwerkswände aus Betonsteinen wurden sehr wenig auf Brandverhalten untersucht. Die Werte in DIN 4102 Teil 4 beruhen im wesentlichen auf Prüferfahrungen, die im Rahmen des SFB 148 im iBMB an bewehrten Betonbauteilen durchgeführt wurden.

Die letzte Prüfungen an Mauerwerkswänden aus Betonsteinen wurde 1984 durchgeführt. Der Markt für Mauerwerkswände aus Betonsteinen ist in Deutschland auch sehr gering.

#### 2.3.2.4 Mauerziegel nach DIN 105

Mauerziegel werden je nach Sorte mit Normalmörtel, Leichtmörtel oder Dünnbettmörtel vermauert. Das Brandverhalten wird entscheidend von der Steinart - Vollstein, Lochstein, Lochanteil, Stegdicken - der Rohdichte, der Festigkeit und dem Brennvorgang beeinflusst.

Unverputzte Ziegelwände neigen sehr zum Abplatzen. Dieses wurde sowohl in Brandprüfungen als auch bei Bränden festgestellt. Aufgrund der vorliegenden Prüferfahrungen scheint das Abplatzen um so stärker, je dünner filigraner die Stege und je spröder die Steine sind. Auch das Lochbild hat ein Einfluß auf dieses Verhalten. Ebenso beeinflussen die Fugenart und der Belastungsgrad das Abplatzverhalten. Eine eindeutige Zuordnung zu bestimmten Randbedingungen konnte jedoch noch nicht definiert werden, weil bisher nur Bauteilprüfungen zum Nachweis bestimmter Feuerwiderstandsklassen durchgeführt wurden. Eine systematische Untersuchung dieser Phänomene erfolgte bisher nicht.

Unverputzte Mauerwerkswände aus Vollsteinen platzen selten bzw. nur minimal ab. Diese Wände werden heute in Deutschland im wesentlichen nur noch als Vormauerschale eingesetzt. Im Ausland werden diese Wände als tragende Wandschalen, wie auch in Deutschland bis Mitte dieses Jahrhunderts, eingesetzt.

Verputzte Wände mit einem Putz nach DIN 4102 Teil 4, Abschnitt 4.5.2.10, Ausgabe 03/1994, können vereinzelt auch unterhalb der Putzschicht abplatzen, jedoch in der Regel wird das Abplatzen durch den Putz verhindert.

Die Wärmedämmeigenschaften von Ziegeln sind je nach Steinart - Vollstein, Hochlochstein bis zum Wärmedämmstein - sehr unterschiedlich. Je höher die Wärmedämmwirkung wird, um so größer wird der Lochanteil und um so filigraner werden die Steine.

Das Beurteilungskriterium bei nichttragenden, raumabschließenden, dünnen Wänden für eine Einstufung in eine Feuerwiderstandsklasse ist bei Mauerwerk aus Ziegeln in der Regel das Überschreiten der maximal zulässigen Temperaturerhöhung und seltener das Versagen aufgrund zu hoher Verformungen. Das Versagen durch Einsturz folgt erst nach dem Überschreiten der Temperaturgrenzen. 140 mm dicke Wände erreichen eine Feuerwiderstandsdauer von > 120 Minuten.

Bei tragenden Ziegelwänden hängen die Versagenszeitpunkte wesentlich vom Abplatzen in Abhängigkeit vom Lochbild und der Steinart, der Wanddicke und dem Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  [F] ab. Dieses spiegelt sich wieder in den Tabellen 39 - 41 von DIN 4102 Teil 4. Es muß festgehalten werden, daß bisher im wesentlichen nur Rohdichteklassen  $\geq 0,8$ , d.h. Rohdichten  $\geq 710 \text{ kg/m}^3$ , nachgewiesen wurden. Je geringer die Rohdichte und auch die Festigkeit der Steine und je filigraner der Stein wird, um so empfindlicher wird die Wand hinsichtlich Brandverhalten. Das kann dazu führen, daß geringere Feuerwiderstandszeiten erreicht werden, als es aufgrund der Wanddik-

ke zu erwarten wäre. Erste Prüfungen wurden mit Rohdichteklasse 0,6 durchgeführt.

#### 2.3.2.5 Kalksandsteine nach DIN 106

Kalksandsteine werden i. d. R. mit Normalmörtel oder Dünnbettmörtel vermauert. Bei der Verwendung von Dünnbettmörtel werden höhere Feuerwiderstandsdauern hinsichtlich des Tragverhaltens erreicht als bei der Verwendung von Normalmörtel.

Kalksandstein bekommt an der beflamten Oberfläche Haarrisse, die während der Brandprüfung nicht erkennbar sind. Das oberflächennahe Material verändert seine Farbe, bleibt aber fest.

Kalksandstein dämmt im Brandfall aufgrund seines Baustoffes und Herstellungsverfahrens gut. Das kristallin gebundene Wasser treibt im Brandfall aus und kühlt, so daß Temperaturerhöhungen auf der feuerabgekehrten Seite immer im Bereich von 100°C stehen bleiben. Nur bei sehr dünnen Wänden und einer langen Temperaturbeanspruchung treten höhere Temperaturen auf.

Bei nichttragenden, raumabschließenden, sehr dünnen Wänden,  $d < 100$  mm, tritt Versagen im Brandfall aufgrund zu großer Verformungen ein. Dieses beruht auf der einseitigen Beflamung. 115 mm dicke unverputzte Wände aus Kalksandsteinen erreichen eine Feuerwiderstandsdauer von  $> 120$  Minuten.

Bis zur Feuerwiderstandsklasse F 90 können unabhängig vom Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  [F] und der Brandbeanspruchung alle tragenden Wände und Pfeiler aus 115 mm dicken Kalksandsteinen, unverputzt oder verputzt, errichtet werden. Diese Ergebnisse sind unabhängig von der Rohdichte und Festigkeit der Kalksandsteine. Ebenso konnten bisher keine Abhängigkeiten vom Lochanteil oder Lochbildern festgestellt werden.

### 2.3.3 Grundlagen der brandschutztechnischen Beurteilung von Mauerwerk nach DIN 4102 Teil 4

DIN 4102 Teil 4 ist ein Katalog, in dem u.a. Prüfergebnisse genormter Mauerwerksbauarten gesammelt und zusammengefaßt wurden. Die Prüfergebnisse wurden auf der Grundlage von Bauteil-Prüfungen nach DIN 4102 Teil 2 und Teil 3 ermittelt.

Die Temperaturbeanspruchung der Bauteile erfolgt nach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) nach DIN 4102 Teil 2, die der Temperaturkurve nach ISO 834 entspricht. Raumabschließende Bauteile, z.B. Trennwände, werden einseitig brandbeansprucht. Nichtraumabschließende Bauteile, z.B. Mauerwerkspfeiler, oder tragende Wände innerhalb eines Brandabschnittes, werden zwei- bis vierseitig brandbeansprucht. Es liegen zahlreiche Prüfergebnisse für tragende und nichttragende, jeweils raumabschließende Mauerwerkswände vor, die in den Tabellen 38 und 39 von DIN 4102 Teil 4 aufgenommen wurden. Die vorliegenden Ergebnisse von nichtraumabschließenden Pfeilern und Wandabschnitten - vierseitig brandbeansprucht - sind in Tabelle 41 zusammengefaßt und wurden für tragende, nichtraumabschließende Wände (Tabelle 40) - zweiseitig brandbeansprucht - als Ausgangswerte für Extrapolationen aufgrund von einigen wenigen Prüferfahrungen zugrunde gelegt. Sie liegen auf der sicheren Seite, weil eine vierseitige Brandbeanspruchung das jeweilige Bauteil schärfer angreift als eine zweiseitige Brandbeanspruchung.

Die Lagerungsbedingungen der Probekörper haben einen wesentlichen Einfluß auf das Prüfergebnis. In der Vergangenheit wurde für Industrieprüfungen zum Erhalt eines Prüfzeugnisses vereinbart, daß nichttragende Wände in einem Prüfrahmen mit einer Mindeststeifigkeit errichtet werden. Die Wände werden stumpf auf den Rahmen aufgemauert und mit einer Mörtelfuge an den oberen Riegel angeschlossen. Hiermit sollen anschließende Bauteile, z.B. Massivdecken, simuliert werden. Bei einer Prüfung erfolgen seitliche Anschlüsse, die kurze Wände mit Anschlüssen an steifere Bauteile simulieren sollen, und bei der



anderen Prüfung werden die Wände seitlich nicht angeschlossen, die lange Wände simulieren sollen. Die freie Dehnung der Wände wird damit ähnlich wie im Bauwerk verhindert. Die thermische Dehnung der Wände im Brandfall wird durch eine ungenau definierte Zwängung verhindert und dadurch wird eine horizontale Verformung im Brandfall hervorgerufen.

Tragende Wände werden am Boden stumpf auf ein Mörtelbett aufgemauert. Am Wandkopf wird eine etwa 5 bis 10 cm dicke Betonausgleichsschicht aufgebracht, über die die Lasteinleitung mit einem Quasi-Gelenk erfolgt. Tragende Pfeiler bzw. Wandabschnitte wurden ebenfalls unten in ein Mörtelbett aufgemauert und oben wurde eine Stahlplatte in eine Mörtelausgleichsschicht eingearbeitet. Die Lasteinleitung erfolgte in beiden Fällen stumpf, so daß beide Enden als eingespannt angesehen werden können.

Im Bild 2.13 sind die Prüfsysteme mit den dazugehörigen statischen Systemen und den Verformungsfiguren dargestellt.

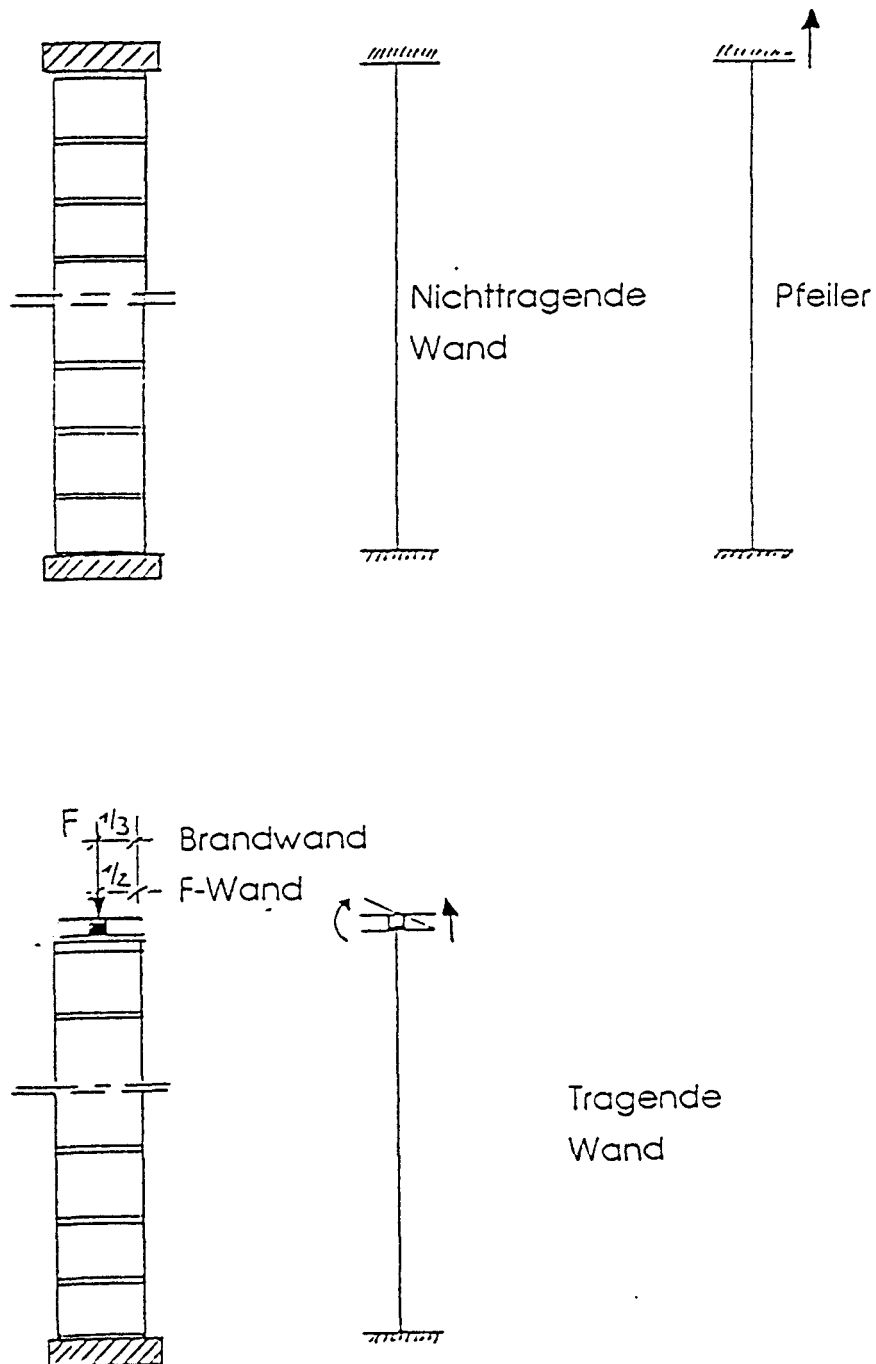


Bild 2.13: Lasteinleitung - Statisches System - Verformungsfigur (Eulerfall)

#### 2.3.4 Fehlende Informationen zur systematischen Bewertung des Brandverhaltens von Mauerwerk

Derzeit erfolgt die brandschutztechnische Beurteilung von Mauerwerk ausschließlich nach DIN 4102 Teil 4, Ausgabe 03/1994. In DIN 4102 Teil 4 wurden verallgemeinerbare Prüfergebnisse aus Bauteilprüfungen nach DIN 4102 Teil 2 und Teil 3 (Stand 1993) tabellarisch zusammengetragen. Als Grundlage und Randbedingungen für die Tabellenwerte gelten die Bemessungsnorm für Mauerwerk DIN 1053 sowie die Baustoffnormen DIN 105, DIN 106, DIN 4165, DIN 18151, DIN 18152, DIN 18153. Zulassungspflichtige Steine und Bauarten sind nicht abgedeckt.

Bei Ausreißern oder fehlenden Prüfergebnissen, bei großen Streubereichen oder bei fehlenden Werten mußten Tabellenwerte auf der sicheren Seite liegend festgelegt werden, weil es bisher kein Rechenverfahren zur Bemessung von Mauerwerk bei Brandbeanspruchung gab.

Das Weiterentwickeln und Verifizieren vorliegender Rechenverfahren konnte bisher nicht durchgeführt werden, weil die erforderlichen Kennwerte für die Baustoffe bei einer Hochtemperaturbeanspruchung fehlten. Es wurden bisher weder thermische noch mechanische Analysen unter Hochtemperaturbeanspruchung durchgeführt. Im Rahmen von Bauteilprüfungen in der MPS BS wurden lediglich zusätzlich Messungen zur Temperaturverteilung innerhalb der Bauteile und zum Verformungsverhalten, soweit mit den vorhandenen Prüfeinrichtungen möglich, durchgeführt.

Das Brandverhalten von Mauerwerk wird durch das Baustoffverhalten der Steine, der Mörtel und das Zusammenwirken von Stein und Mörtel sowie durch das Bauteilverhalten hinsichtlich Schlankheit, Belastung, Auflagerbedingungen, ein- oder mehrseitiger Brandbeanspruchung bestimmt. Der tatsächliche Feuchtigkeitsgehalt im Bauwerk sowie die Ausführungsqualität beeinflussen das Brandverhalten ebenso. Das Feuchtigkeitsverhalten oberhalb der Ausgleichsfeuchte wird in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt, weil gemäß der bestehenden

brandschutztechnischen Philosophie Ausgleichsfeuchte im Bauwerk vorausgesetzt wird. Es liegen Erkenntnisse vor, daß zu hohe Feuchtigkeitsgehalte zu zerstörerischen Abplatzungen führen können. Die Ausgleichsfeuchte wird bei der Ermittlung der thermischen Materialeigenschaften im Bereich von 100 °C berücksichtigt, weil die Umsetzung zu Wasserdampf einen Kühleffekt bewirkt. Als Ausführungsqualität muß bei dieser Arbeit, aufgrund der sehr großen Datenfülle vorausgesetzt werden, daß entsprechenden den bestehenden Normen gemauert wird. Es ist bekannt, daß z.B. nicht voll vermörtelte Lagerfugen zu einer Verringerung der Tragfähigkeit oder daß auch der Wasser-Zement-Wert des Mörtels das Tragverhalten der Mauerwerkswand beeinflusst. Der Einfluß der Ausführungsqualität auf das Brandverhalten einer Mauerwerkswand wurde bisher nicht untersucht, weil zuerst einmal die grundlegenden Materialeigenschaften ermittelt werden sollen, bevor weitere Einflußfaktoren systematisch untersucht werden. Es ist jedoch davon auszugehen, daß der Einfluß in etwa den „kalten“ Verhältnissen entsprechen wird.

#### 2.4 Schlußfolgerungen, Einflußparameter

Im Bild 2.14 sind die wesentlichen Einflußparameter zusammengestellt, die das Brandverhalten von Mauerwerk beeinflussen. Die bisher fehlenden Informationen sind markiert. Die Spalte Steineigenschaften ist noch eine Stufe weiter zu unterteilen.

Diese fehlenden Informationen sind jedoch Grund-Voraussetzung für die Entwicklung und Anwendung eines Rechenverfahrens. In parallel laufenden Forschungsvorhaben [13], [14], [15], [16] wurden daher für jede Baustoffart erste Eigenschaftswerte unter Hochtemperaturbeanspruchung ermittelt. Diese Werte bilden die Grundlage für diese Arbeit.

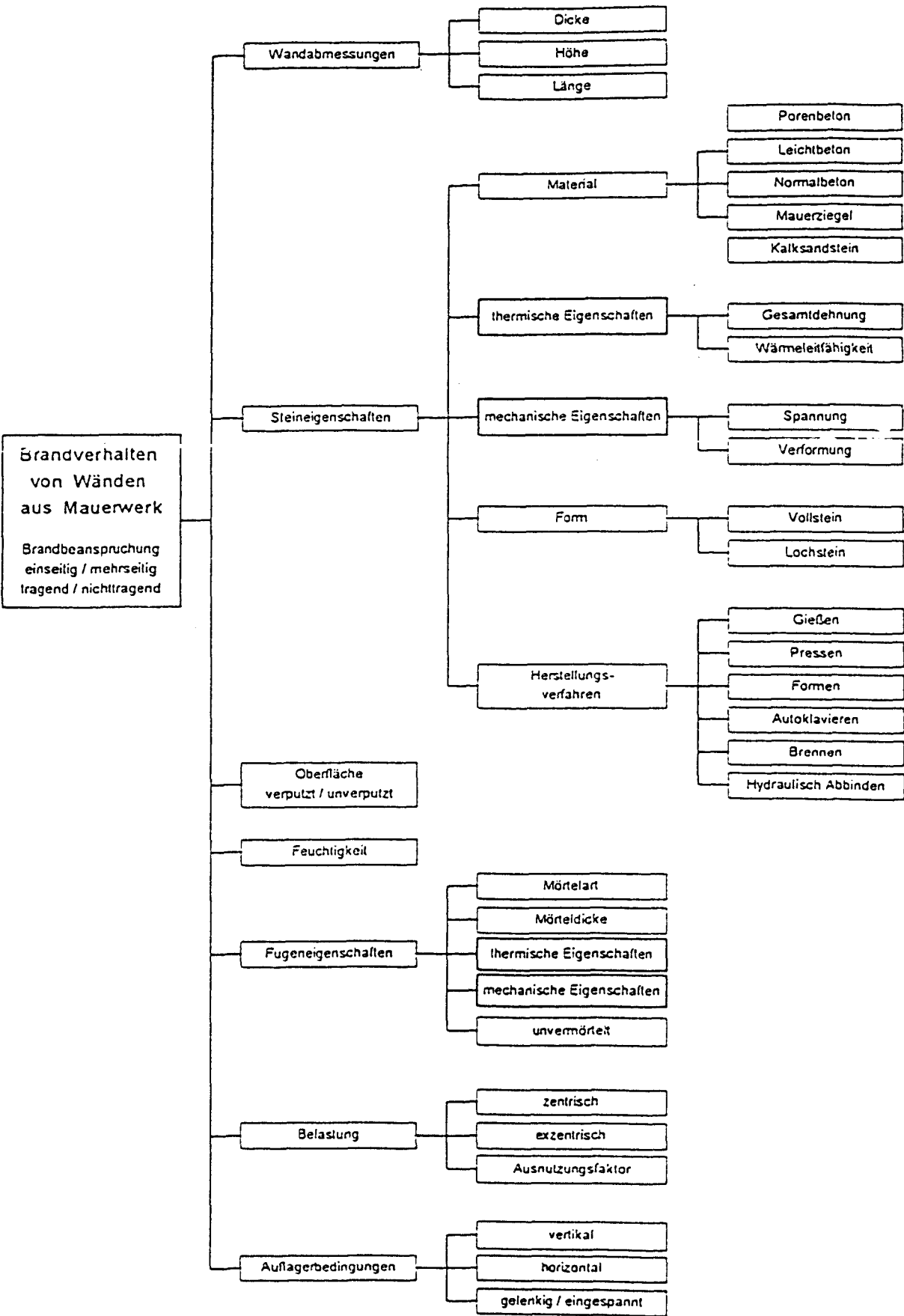


Bild 2.14: Einflußparameter zum Brandverhalten von Mauerwerk

3 THERMISCHE MATERIALEIGENSCHAFTEN UNTER HOCHTEMPERATUR-  
BEANSPRUCHUNG

3.1 Allgemeines zu den Temperatureigenschaften

Mauerwerk wird während einer Brandeinwirkung durch Energiezufuhr zunächst erst einmal erwärmt. Die vom Mauerwerk aufgenommene Wärmemenge erhöht das jeweils vorhandene Energieniveau. Dieses Niveau in Form von Temperaturen innerhalb des Bauteils kann bei Normbrandprüfungen nach DIN 4102 als Zusatzmessung ermittelt werden. Nach Kenntnis der thermischen Materialeigenschaften kann dieses Niveau auch berechnet werden.

Mit zunehmender Temperatur verändern sich die Eigenschaften der Einzelbaustoffe von Mauerwerk, wobei bei Temperaturen von deutlich über 100 °C von Hochtemperatureigenschaften der Baustoffe gesprochen wird. Die Hochtemperatureigenschaften der Baustoffe werden unterschieden in thermische Hochtemperatureigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , Dichte  $\rho$ , Wärmekapazität  $c_p$ , thermische Dehnung  $\epsilon_{th}$  und in mechanische Hochtemperatureigenschaften wie Festigkeit  $\sigma$ , Elastizitätsmodul  $E$  und Verformungsverhalten, s.a. Bild 3.1.

Hochtemperatur- Eigenschaften					
Thermische Eigenschaften				Mechanische Eigenschaften	
Dichte	spez. Wärme- kapazität	Wärme- leitfähigkeit	Therm. Dehnung	Festigkeit	Verformung

Bild 3.1: Baustoffeigenschaften unter Temperaturbeanspruchung

### 3.2 Grundlagen der Wärmeentwicklung durch Brand

Die Temperaturentwicklung während eines Brandes wird im wesentlichen von der Brandlast - Art, Menge, Anordnung -, von den Ventilationsbedingungen - Verhältnis der Zu- und Abluftöffnungen zur Begrenzungsfläche des Brandraumes - und dem Brandraum selbst - Geometrie, isolierende Eigenschaften der umgebenden Bauteile - bestimmt. Aus der daraus resultierenden Vielzahl von unterschiedlichen „natürlichen Bränden“ ist das auf internationale Vereinbarungen beruhende Temperatur / Zeitgesetz, die sog. Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) nach DIN 4102 entsprechend ISO-Kurve nach ISO 834, als einheitlicher Beurteilungsmaßstab für das Brandverhalten von Bauteilen und Bauwerken bestimmt worden.

Die Kenntnis des Temperatur/Zeitgesetzes der Umgebung, der Übergangsbedingungen an der Mauerwerksoberfläche und des Wärmestroms selbst mit seinen Anteilen aus Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung ist Voraussetzung zur Berechnung der Entwicklung der instationären Temperaturfelder im Querschnittsinneren der Mauerwerkswände und -pfeiler. Bei den ölbeheizten Brandkammern in Deutschland spielt die Wärmeleitung bei der Wärmeübergabe von Flammen an ihre Umgebung aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit der Gase eine so geringe Rolle, daß sie deshalb bei Wärmeübergangsberechnungen nicht separat berücksichtigt wird.

Der Wärmeübergang an der Grenzschicht Bauteilumgebung/Mauerwerksoberfläche kann hinreichend genau mit einheitlichen Beiwerten jeweils für Konvektion und Strahlung beschrieben werden. In [18] wurde erstmals versucht, Rechenwerte für die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  und das Emissionsverhältnis  $\varepsilon$  für geputztes Kalksandsteinmauerwerk im Vergleich zu Beton bei verschiedenen Brandbeanspruchungen zu ermitteln. Aufgrund versuchstechnischer Probleme sind jedoch die Versuchswerte für das untersuchte Mauerwerk nicht vertrauenswürdig.

Die Berechnung der instationären Temperaturverteilung in brandbeanspruchten Bauteilkonstruktionen erfolgt mit Rechenprogrammen, z.B. auf der Grundlage der Methode finiter Elemente oder des Differenzenverfahrens. Die für die Erwärmung von Bauteilen maßgebenden Baustoffeigenschaften werden durch die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  und die Dichte  $\rho$  beschrieben. Die Kenntnis der Veränderung dieser Werte mit ansteigender Temperatur  $T$  ist für die Entwicklung eines rechnerischen Nachweisverfahrens erforderlich.

Zur Vereinfachung der Berechnung kann die für das Verdampfen der im Bauteil enthaltenen Feuchtigkeit verbrauchte Energie ersatzweise durch Vergrößerung der spezifischen Wärmekapazität im Bereich zwischen 100 °C und 200 °C berücksichtigt werden. Solange die Feuchtigkeit nicht restlos verdampft ist, steigt die Bauteiltemperatur in diesen Bereichen nicht über die Verdampfungstemperatur. Das Fortschreiten der Durchwärmung des Bauteils ist dem Ausdruck  $\lambda/(c_p \cdot \rho)$  proportional.

Da sich nahezu alle Festkörper mit steigender Temperatur dehnen, ist die Kenntnis der thermischen Dehnung zur Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens ebenfalls von Bedeutung.

### 3.3 Zusammenfassung vorliegender Erkenntnisse

Weder national noch international lagen Angaben zu den thermischen Hochtemperatureigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , Dichte  $\rho$ , Wärmekapazität  $c_p$ , thermische Dehnung  $\epsilon_{th}$  von Mauerwerk vor. Lediglich für einige nicht für Mauerwerk typische Mörtel waren im Rahmen des SFB 148 im iBMB thermische Dehnungen ermittelt worden.

In der Mehrzahl der Normbrandprüfungen an Mauerwerk zur Ermittlung der Feuerwiderstandsklasse nach DIN 4102 Teil 2 oder zum Nachweis der Eignung als Brandwand nach DIN 4102 Teil 3 wurden lediglich die Oberflächentemperaturen auf der feuerab-



gekehrten Seite bestimmt. Erst in den letzten 10 Jahren wurden, wenn der Auftraggeber den zusätzlichen Messungen zustimmte, auch die Temperaturverteilung innerhalb des Mauerwerkquerschnittes ermittelt. Zur Messung der Temperaturverteilung wurden in etwa halber Bauteilhöhe im Bereich der Lagerfugen sog. Thermoleitern eingemörtelt. Ein Anbohren der Steine wurde nicht durchgeführt, weil nicht sichergestellt werden konnte, daß damit die Konstruktion in ihrem Tragverhalten nicht negativ beeinflusst wurde.

Messungen der Temperaturverteilung in Mauerwerk sind nur aus dem iBMB bekannt.

In den Tabellen 1 - 5, s. Anlagen 1.1 - 1.5, sind Kennwerte aller vorliegenden deutschen Normbrandprüfungen zusammengefaßt. Es wurden jeweils die Prüfungen gekennzeichnet, bei denen die Temperaturverteilung ermittelt wurde.

Zusätzlich wurden im Rahmen eines Untersuchungsvorhabens [17] zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer von Mauerwerk aus hochfesten Kalksandsteinen und Ziegeln erstmals die Längenänderungen der Mauerwerkswände und -pfeiler bei ein- und vierseitiger Brandbeanspruchung sowie die horizontalen Verformungen bei vierseitiger Brandbeanspruchung ermittelt. Bei Normbrandprüfungen werden i.d.R. bei einseitiger Brandbeanspruchung nur horizontale Verformungen in Wandmitte gemessen.

Die Auswertung der Meßergebnisse und die daraus entwickelten Rechenwerte für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , Dichte  $\rho$ , Wärmekapazität  $c_p$ , thermische Dehnung  $\epsilon_{th}$  von Mauerwerk werden ausführlich in Kapitel 6.1 erläutert.

#### 4 MECHANISCHE MATERIALEIGENSCHAFTEN DER EINZELBAUSTOFFE UNTER HOCHTEMPERATURBEANSPRUCHUNG

##### 4.1 Allgemeines zu den mechanischen Materialeigenschaften

Die Kenntnisse über das mechanische Materialverhalten der Einzelbaustoffe bilden eine wichtige Grundlage, um das Trag- und Verformungsverhalten von Mauerwerk unter Hochtemperaturbeanspruchung zutreffend analytisch beschreiben zu können. Unter Hochtemperaturbeanspruchung versteht man den Temperaturbereich von erhöhter Temperatur gegenüber der Normaltemperatur bis zum Erreichen des Schmelzpunktes.

Die Ergebnisse der Baustoffuntersuchungen bei hohen Temperaturen hängen wesentlich von der zu ihrer Ermittlung angewendeten Untersuchungsmethode ab. Bei Hochtemperatur-Untersuchungen ist grundsätzlich zwischen stationären und instationären Versuchsdurchführungen zu unterscheiden. Im stationären Zug- oder Druckversuch wird die Baustoffprobe auf die vorher festgelegte Temperatur elektrisch erwärmt und dann last- oder verformungsgesteuert bis zum Bruch gefahren. Diese Versuche geben Aufschluß über das Verhalten der Festigkeit, des Elastizitätsmodul und der Bruchdehnung der Einzelbaustoffe bei hohen Temperaturen.

Zur Erfassung des Verformungsverhaltens von Mauersteinen, Mörtel und der Kombination - Mauerwerk - im Hinblick auf den Brandfall sind stationäre Versuche nur bedingt geeignet. Hierfür sind spezielle Untersuchungen erforderlich, die vor allen Dingen berücksichtigen, daß die Bauteile im allgemeinen schon vor Beginn der Erwärmung durch die Gebrauchslasten mechanisch belastet sind und erst dann die instationäre Temperaturbeanspruchung erfahren. Der instationäre Druck- oder Zugversuch entspricht diesen Verhältnissen. Die Baustoffproben werden mechanisch belastet und danach mit konstanter Aufheizgeschwindigkeit erwärmt, wobei entweder die Anfangsspannung (instationärer Kriechversuch) oder die Anfangsverformung (instationärer Zwängungsversuch) konstant gehalten wird.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 148 im iBMB wurden hierzu Prüfmaschinen und dazugehörige Prüfverfahren entwickelt. Auf dieser Grundlage wurden die Untersuchungen zur Bestimmung der mechanischen Materialeigenschaften von Mauerwerk aufgebaut.

#### 4.2 Untersuchungsmethoden zur Bestimmung des Hochtemperaturverhaltens

In Abstimmung mit den Steinindustrien wurden folgende Untersuchungen zur Ermittlung der mechanischen Hochtemperatur-Materialkennwerte durchgeführt:

- $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche bei 20 °C (Referenzversuch),
- $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche bei unterschiedlichen Temperaturen,
- Thermische Dehnung  $\epsilon_{th}$  unbelasteter Proben,
- Gesamtdehnungen  $\epsilon_w$  bei instationärer Erwärmung unter Last (sog. Warmkriechversuche).

Ausführlich wird in den Forschungsberichten [13], [14], [15] und [16] auf die Prüfmaschinen, s. Anlage 3.1, und Details zur Prüfungsdurchführung eingegangen. Im folgenden werden nur die wesentlichen Angaben zu den Untersuchungsmethoden zusammengefaßt.

Es wurden jeweils zwei Steinsorten für die Steinarten - Kalksandstein, Porenbeton, Leichtbeton und Ziegel - geprüft, s. Tabelle 4.1. Zusätzlich wurde bei Kalksandstein, Leichtbeton und Ziegel zwischen Vollstein und Lochstein variiert. Außerdem wurden unterschiedliche Festigkeiten mit dazugehörigen Rohdichten, z.B. bei Porenbeton, geprüft. In gleicher Weise wurden verschiedene Mörtelarten untersucht.

Baustoff	Bezeichnung	Loch- bild	Festigkeit		Rohdichte	
			Klasse	i.M. [N/mm <sup>2</sup> ]	Klasse	i.M. [kg/m <sup>3</sup> ]
Poren- beton	P 2-0,5	Voll- stein	2	4,01 <sup>2)</sup>	0,5	454
	P 4-0,6		4	4,61 <sup>1)</sup>	0,6	563
Leicht- beton	Vbl 2-0,7	Voll- stein	2	2,1	0,7	664
	Hbl 2-0,5		2	2,0	0,5	704 <sup>3)</sup>
Kalksand- stein	KS 20-1,8	Voll- stein	20	24,2 <sup>1)</sup>	1,8	1.780
	KSL12-1,4		12	23,73 <sup>2)</sup>	1,4	1.370
Ziegel	Mz 12-1,6	Voll- stein	12	11,5 <sup>4)</sup>	1,6	1.604 <sup>5)</sup>
	Hlz B 12- 1,0		12	17,8	1,0	1.013 <sup>5)</sup>
Leicht- mörtel	LM 21	—	21	3,82	—	—
Leicht- mörtel	LM 36	—	36	9,3	—	—
Normal- mörtel	NM III	—	III		—	—
Normal- mörtel	NM IIIa	—	IIIa	23,29	—	—

- 1) Der Wert liegt minimal unter der Klasse
- 2) Der Wert liegt im oberen Bereich der Klasse
- 3) Der Wert liegt oberhalb der Klasse
- 4) Der Wert liegt unterhalb der Klasse
- 5) Der Wert liegt minimal oberhalb der Klasse

Tabelle 4.1 :    Untersuchte Einzelbaustoffe

#### 4.2.1 $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche

Einaxiale  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche wurden unter Normaltemperatur 20 °C als Referenzversuche und unter Hochtemperatur durchgeführt.

In die einaxiale Prüfmaschine werden Steinproben (Sollmaße) 100 mm x 100 mm x Steinhoch (i.d.R. 240 mm) bzw. Mörtelproben  $\varnothing$  80 mm x 300 mm hoch eingebaut und mit 2 K/min elektrisch aufgeheizt. Während der Versuchsdauer werden die senkrechten Verformungen des Probekörpers über Wegaufnehmer ermittelt.

Die Form und Art der Probekörper sind aus der Anlage 3.2 zu entnehmen. Die Porenbeton-Prismen wurden aus Blocksteinen herausgesägt, die für Bauteilprüfungen angeliefert worden waren, so daß ein direkter Vergleich möglich ist. Ebenso wurden die Leichtbeton-Lochprismen und Kalksand-Vollprismen aus Blöcken bzw. Planelementen gesägt, die für Bauteilprüfungen angeliefert worden waren. Die Kalksand-Lochprismen wurden aus extra angelieferten Steine mit einem gleichmäßigen Lochbild herausgesägt. Die Leichtbeton-Vollprismen und die Ziegel-Loch- sowie Vollprismen wurden von der Industrie jeweils in den entsprechenden Maßen hergestellt und angeliefert.

Die Probekörper wurden in die Prüfmaschine eingebaut, stumpf gegen das Widerlager gefahren und dann jeweils bis zur vorgeählten Temperatur - 150 °C, 250 °C, 350 °C, 450 °C, 550 °C, 650 °C und 750 °C - aufgeheizt. Zur gleichmäßigen Durchwärmung (Homogenisierung) wurden die Proben etwa 2 Stunden unter dieser Temperatur gehalten und dann jeweils bis zum Bruch belastet. Die Belastung erfolgte mit einer Geschwindigkeit von etwa 2 % der „kalten“ Bruchlast/Sekunde. In Einzelfällen wurde überprüft, ob und inwieweit die Belastungsgeschwindigkeit das Prüfergebnis beeinflußt.

#### 4.2.2 Thermische Dehnung $\varepsilon_{th}$ und Gesamtdehnungen $\varepsilon_w$ (sog. Warmkriechversuche)

Die thermische Dehnung  $\varepsilon_{th}$  wird durch gleichmäßiges Aufheizen unbelasteter Proben ermittelt.

Zur Ermittlung der Gesamtdehnung  $\varepsilon_w$  werden die Probekörper in die Prüfmaschine eingebaut, mit einer vorgewählten Belastung - 15 %, 30 %, 45 %, 60 % oder 75 % der (Probekörper)Druckfestigkeit bei Normaltemperatur - belastet und dann mit konstanter Temperaturerhöhung von 2 K/min bis zum Bruch aufgeheizt.

Mit Quarzglastäben, die temperaturbeständig sind, wird über daran angeschlossene Wegaufnehmern jeweils die einaxiale Dehnung in senkrechter Richtung gemessen.

Aufgrund einiger unerwarteter Ergebnisse, die in dem Abschnitt 4.3 vorgestellt werden, wurden zusätzlich Warmkriechversuche mit einer stufenweisen Erhöhung der Belastung durchgeführt. Die Proben wurden z.B. mit 60 % der kalten Bruchlast belastet, auf 300 °C aufgeheizt, dann wurde die Belastung langsam auf 80 % erhöht, weiter aufgeheizt auf 400 °C, dann die Belastung erhöht und wiederum weiter aufgeheizt. Diese stufenweise Belastung mit stufenweiser Temperaturerhöhung wurde bis zum Bruch durchgeführt.

Die Ergebnisse bei stufenweiser Belastung werden im Abschnitt 4.3.1.1 zusammengefaßt.

### 4.3 Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung der mechanischen Materialeigenschaften unter Hochtemperaturbeanspruchung

#### 4.3.1 Steine

Im folgenden werden die Untersuchungsergebnisse der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche, der thermischen Dehnung  $\epsilon_{th}$  und der Gesamtdehnung  $\epsilon_w$  für die einzelnen Steinarten zusammengefaßt und gegenübergestellt. Die Einzelergebnisse können den o.a. Forschungsberichten entnommen werden.

##### 4.3.1.1 Untersuchungsergebnisse und Bewertung Porenbeton

Es wurde Porenbeton P2-0,5 und P4-0,6 als Voll-Prismen untersucht. Die Proben wurden bis 850°C aufgeheizt. In Bild 4.1 werden die Ergebnisse aus den  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche und in Bild 4.2 die Ergebnisse aus den Versuchen zur thermischen Dehnung  $\epsilon_{th}$  und zur Gesamtdehnung  $\epsilon_w$  grafisch zusammenfassend dargestellt. Die Einzelergebnisse können der Anlage 3.3 entnommen werden.

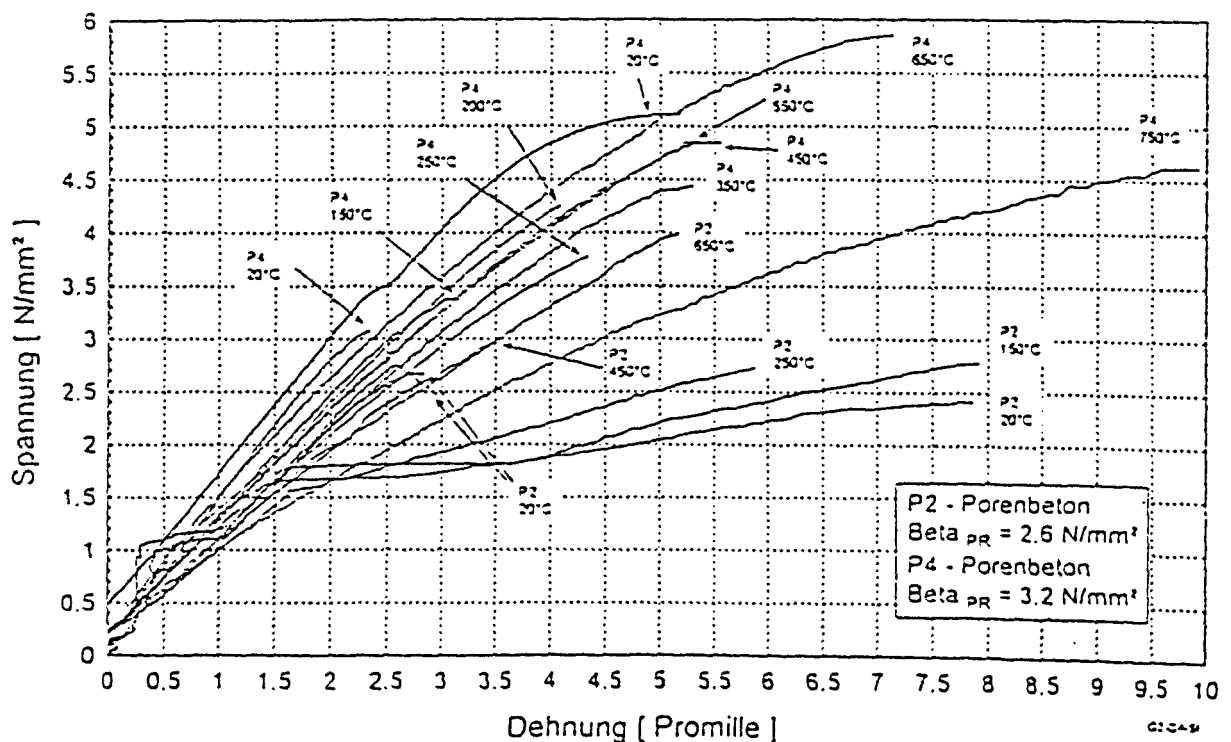


Bild 4.1:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche - Vergleich P2-0,5 und P4-0,6

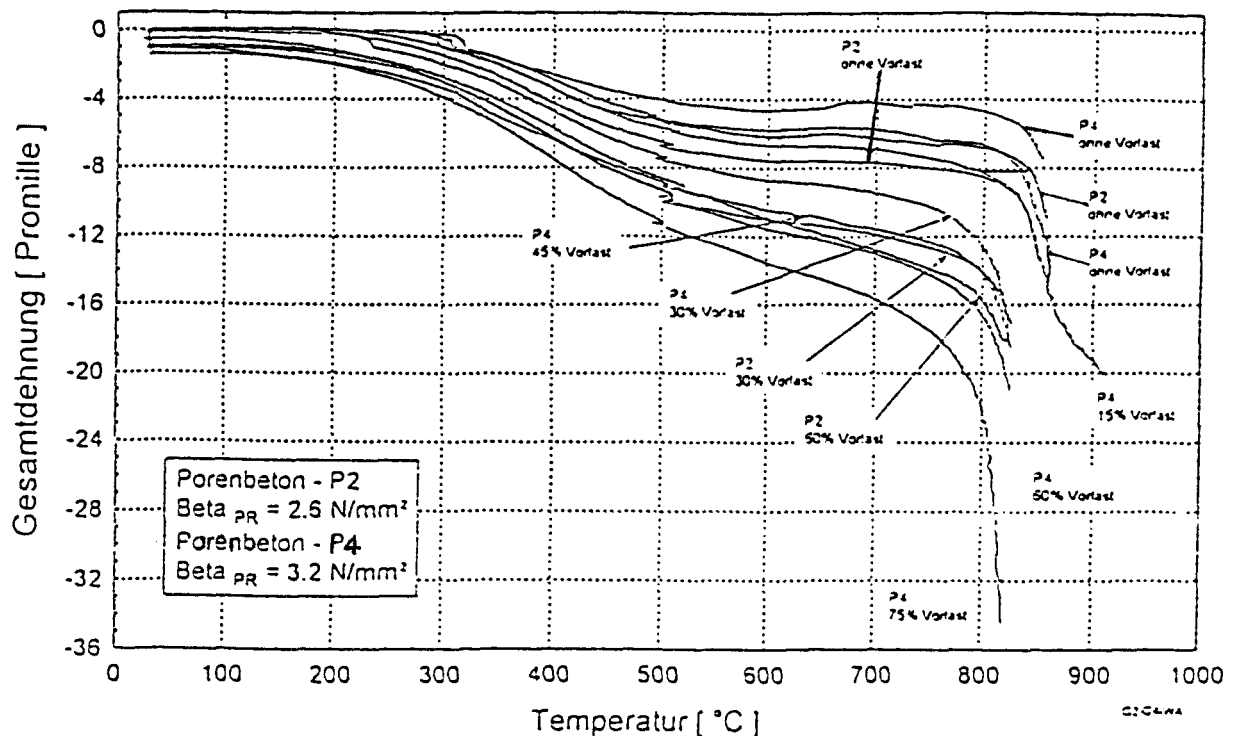


Bild 4.2: Thermische Dehnung  $\varepsilon_{th}$  und Gesamtdehnung  $\varepsilon_w$  bei unterschiedlicher Vorlast - Vergleich P2-0,5 und P4-0,6

Die  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Kurven und Verformungskurven  $\varepsilon_{th}$  und  $\varepsilon_w$  für Porenbeton P4 passen von der Systematik gut zusammen. Beim Porenbeton P2 wurden aus Kostengründen lediglich Stichproben durchgeführt, bei denen einige Ausreißer auftreten.

Bei den  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Kurven ist festzustellen, daß ab einer Temperatur von  $> 200$  °C die aufnehmbare Spannung  $\sigma$  gegenüber dem 20 °C-Wert des Probekörpers zunimmt und erst ab etwa 700 °C wieder abnimmt. Die maximale aufnehmbare Spannung  $\sigma$  liegt etwa 70 % - 80 % über dem Ausgangswert bei 20 °C. Da die Zunahme der maximalen aufnehmbaren Spannung  $\sigma$  unter Hochtemperaturbeanspruchung bisher für andere Baustoffe nicht bekannt war, wurden die bereits erwähnten zusätzlichen Warmkriechversuche mit stufenweiser Belastung durchgeführt. Hiermit konnte nachgewiesen werden, daß bei höheren Temperaturen die aufnehmbaren Spannungen gegenüber dem Wert bei 20 °C zunimmt. Mit die-



sen Zusatzversuchen sollten Fehler, die sich vielleicht aus der Untersuchungsmethode eingeschlichen hatten, ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse sind in Bild 4.3 dargestellt.

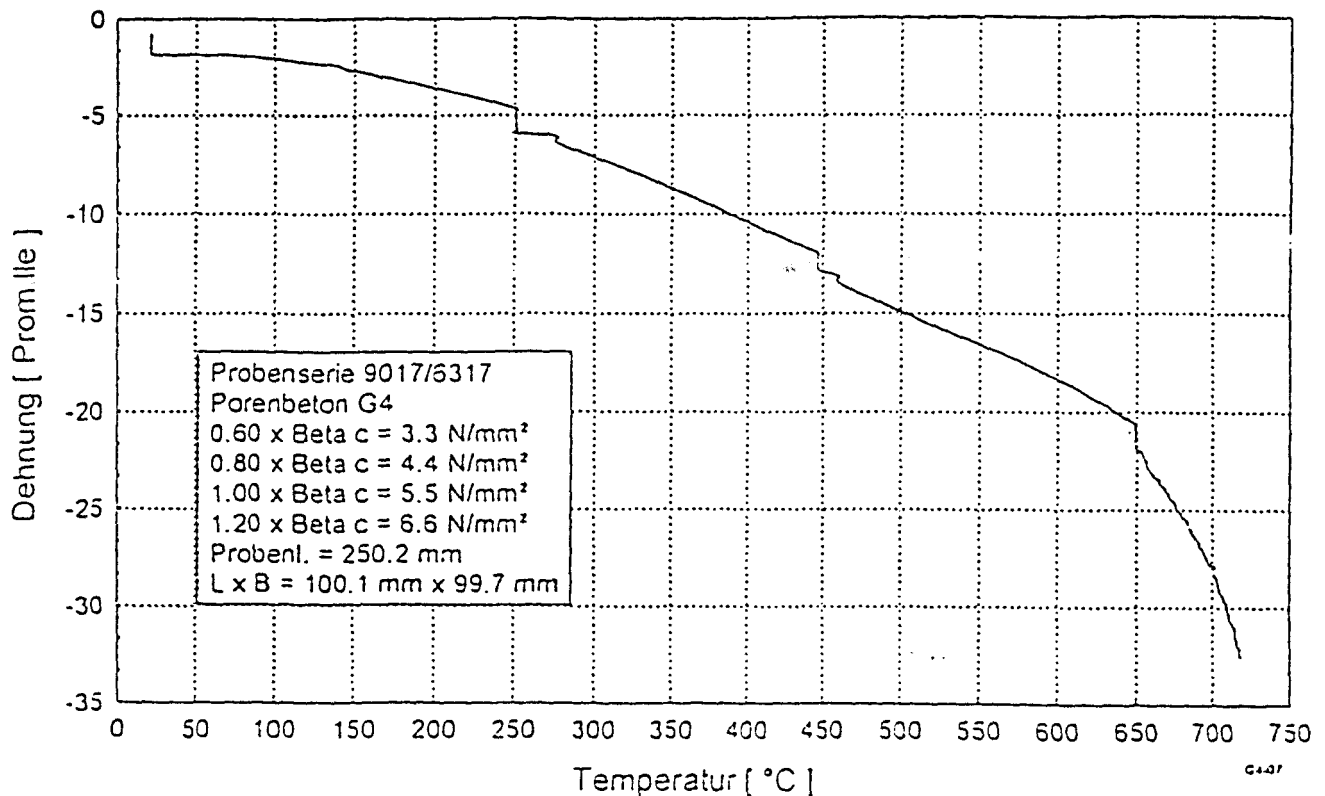


Bild 4.3: Gesamtdehnung  $\epsilon_w$  bei stufenweiser Belastung - P 4

Die Dehnungen bei maximaler Last von P4-0,6 bei 350 °C betragen etwa 5,3 ‰, bei 550 °C ebenso ca. 5,3 ‰ und bei 650 °C ca. 7,2 ‰, von P2-0,5 bei 450 °C etwa 3,5 ‰ und bei 650 °C etwa 5,3 ‰. Die Dehnungen scheinen aufgrund der bisher vorliegenden Ergebnisse abhängig von der Steifigkeit zu sein.

Endgültige Rückschlüsse lassen sich aus den Kurven des Bildes 4.1 bisher nicht ziehen.

Die beiden Kurven der thermischen Dehnung ohne Vorlast verlaufen bei P2-0,5 und P4-0,6 bis zur Versagenstemperatur von ca. 850 °C ähnlich. Die maximale Dehnung beträgt bei den geprüften P2-0,5 etwa 7,8 ‰, dagegen und bei P4-0,6 nur etwa 5,5 ‰.

Bis zu einer Vorlast von etwa 15 % des Ausgangswertes bei 20 °C treten bis etwa 300°C keine Verformungen bzw. nur relativ geringe Stauchungen auf; oberhalb von 300 °C nehmen die Stauchungen bis 600°C stark zu, bis 800°C treten dann nur noch relativ geringe Verformungen auf bis zur Versagenstemperatur von etwa 820°C - 850°C. Die maximalen Stauchungen betragen etwa 7 ‰.

Bei höheren Vorlasten treten bis etwa 200 °C - 250 °C nur minimale Stauchungen auf, die bis 600 °C in relativ große Stauchungen übergehen und dann bis zur Versagenstemperatur von  $\geq 820$  °C nur noch minimal zunehmen. Die maximale Stauchung beträgt etwa 20 ‰.

Auf Bild 4.2 sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Steinarten hinsichtlich der Versagenstemperaturen und hinsichtlich der dabei aufgetretenden Gesamtverformungen erkennbar.

#### 4.3.1.2 Untersuchungsergebnisse und Bewertung Kalksandstein

Es wurden Kalksandsteine als Voll-Prismen KS 20-1,8 und als Loch-Prismen KSL 12-1,4 untersucht. Die Proben wurden bis 850°C aufgeheizt. In Bild 4.4 werden die Ergebnisse aus den  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche und in Bild 4.5 die Ergebnisse aus den Versuchen zur thermischen Dehnung  $\epsilon_{th}$  und zur Gesamtdehnung  $\epsilon_w$  grafisch zusammenfassend dargestellt. Die Einzelergebnisse können der Anlage 3.4 entnommen werden.

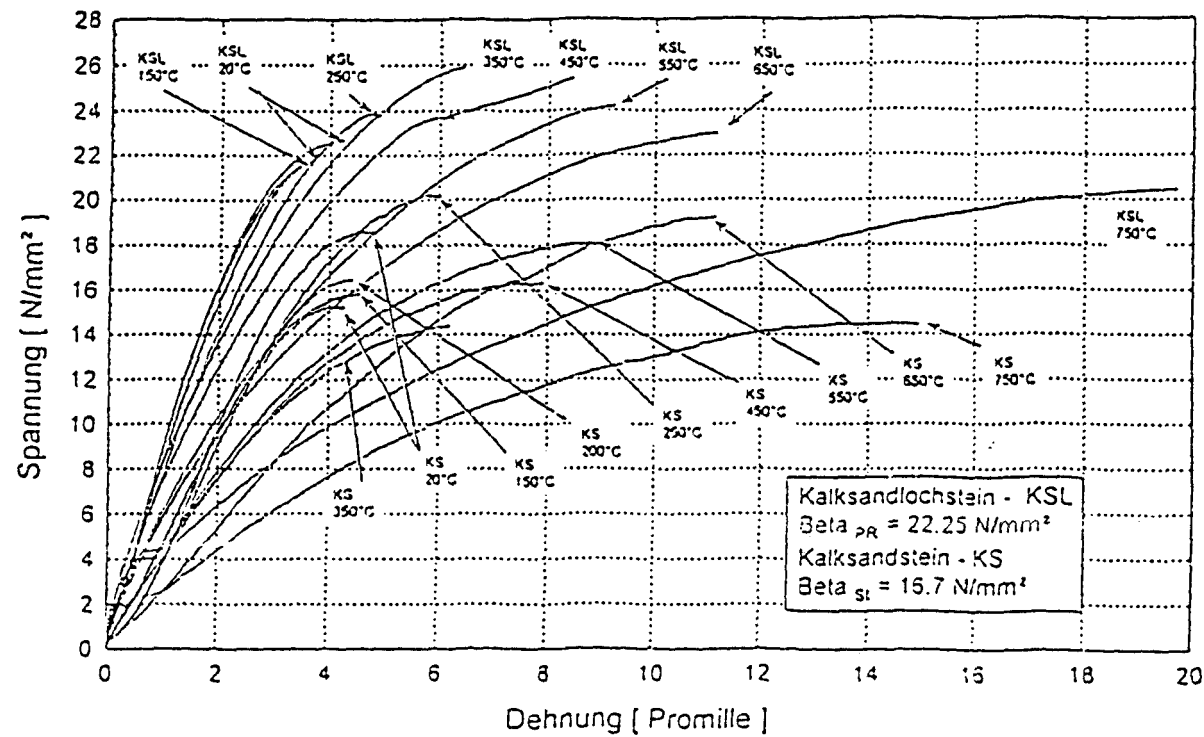


Bild 4.4:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche - Vergleich KS 20-1,8 und KSL 12-1,4

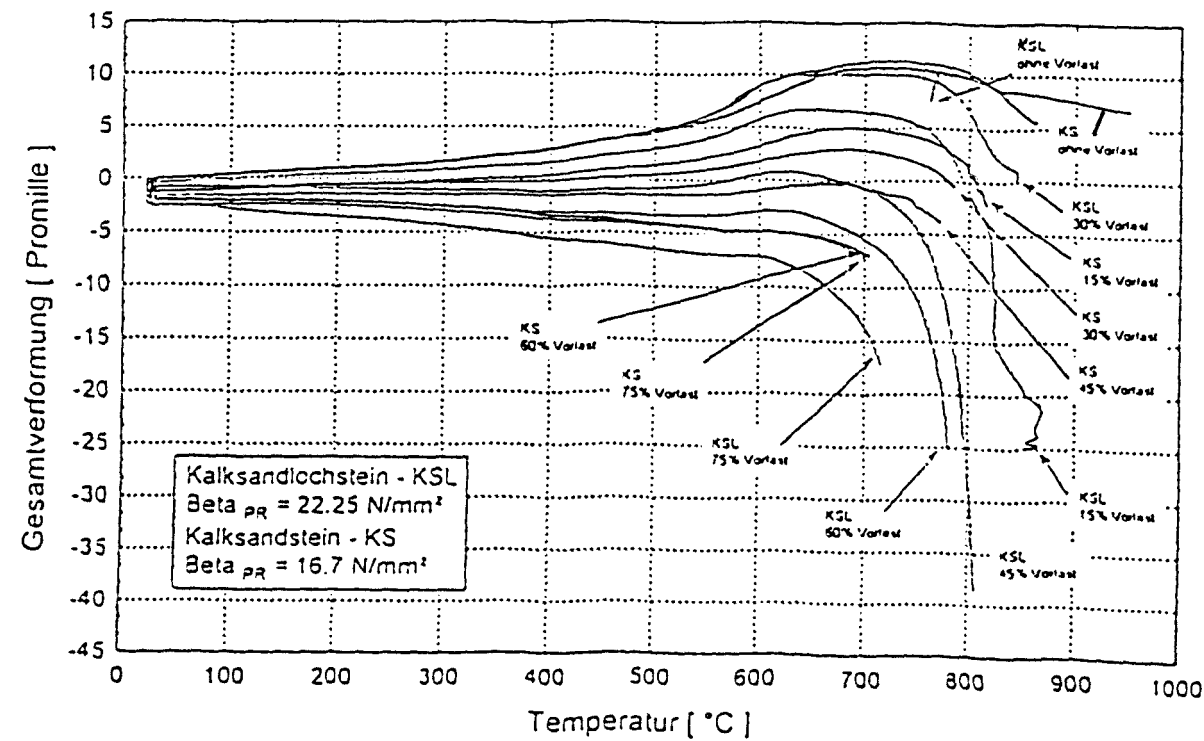


Bild 4.5: Thermische Dehnung  $\epsilon_{th}$  und Gesamtdehnung  $\epsilon_w$  bei unterschiedlicher Vorlast - Vergleich KS 20-1,8 und KSL 12-1,4

Die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurven und Verformungskurven  $\epsilon_{th}$  und  $\epsilon_w$  für die einzelnen Steinarten passen von der Systematik gut zusammen.

Bei den  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurven ist festzustellen, daß ab einer Temperatur von  $> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  die aufnehmbare Spannung  $\sigma$  gegenüber dem  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Wert des Probekörpers zunimmt und erst ab etwa  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  wieder auf den  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Wert zurückgeht. Die maximale aufnehmbare Spannung  $\sigma$  liegt etwa  $20\text{ \%}$  -  $25\text{ \%}$  über dem Ausgangswert bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Die Dehnungen bei  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  betragen etwa  $6\text{ }^{\circ}/\text{‰}$ , bei  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  ca.  $9\text{ }^{\circ}/\text{‰}$  und bei  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  ca.  $11\text{ }^{\circ}/\text{‰}$ . Die Dehnungen scheinen aufgrund der bisher vorliegenden Ergebnisse annähernd unabhängig von der Steifigkeit zu sein.

Rückschlüsse auf den Einfluß des Lochanteils lassen sich aus den Kurven des Bildes 4.4 bisher nicht ziehen.

Die beiden Kurven der thermischen Dehnung ohne Vorlast verlaufen bei KS und KSL bis zur Versagenstemperatur von ca.  $770\text{ }^{\circ}\text{C}$  des KSL nahezu gleich. Die maximale Dehnung beträgt bei den geprüften KS 20-1,6 etwa  $11\text{ }^{\circ}/\text{‰}$  und bei KSL 12-1,4 etwa  $10,5\text{ }^{\circ}/\text{‰}$ .

Bis zu einer Vorlast von etwa  $45\text{ \%}$  des Ausgangswertes bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  dehnen sich die Kalksandsteine aus; erst bei einer Temperatur oberhalb von  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  gehen die Dehnungen wieder zurück.

Bei höheren Vorlasten treten bis etwa  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  nur minimale Verformung auf, die bis  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  in relativ geringe Stauchungen übergehen und dann bis zur Versagenstemperatur von  $\geq 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  stark zunehmen. Die maximale Stauchung beträgt etwa  $7,5\text{ }^{\circ}/\text{‰}$ .

Auf Bild 4.5 sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Steinarten hinsichtlich der Versagenstemperaturen erkennbar, wohl aber hinsichtlich der dabei aufgetretenden Gesamt-

verformungen; diese sind bei Kalksandlochsteinen durchweg größer.

#### 4.3.1.3 Untersuchungsergebnisse und Bewertung Leichtbeton

Es wurde Leichtbeton mit Naturbims als Zuschlag als Voll-Prismen Vbl 2-0,7 und als Loch-Prismen Hbl 2-0,5 untersucht. Die Proben wurden bis 850°C aufgeheizt. In Bild 4.6 werden die Ergebnisse aus den  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche und in Bild 4.7 die Ergebnisse aus den Versuchen zur thermischen Dehnung  $\epsilon_{th}$  und zur Gesamtdehnung  $\epsilon_w$  grafisch zusammenfassend dargestellt. Die Einzelergebnisse können der Anlage 3.5 entnommen werden.

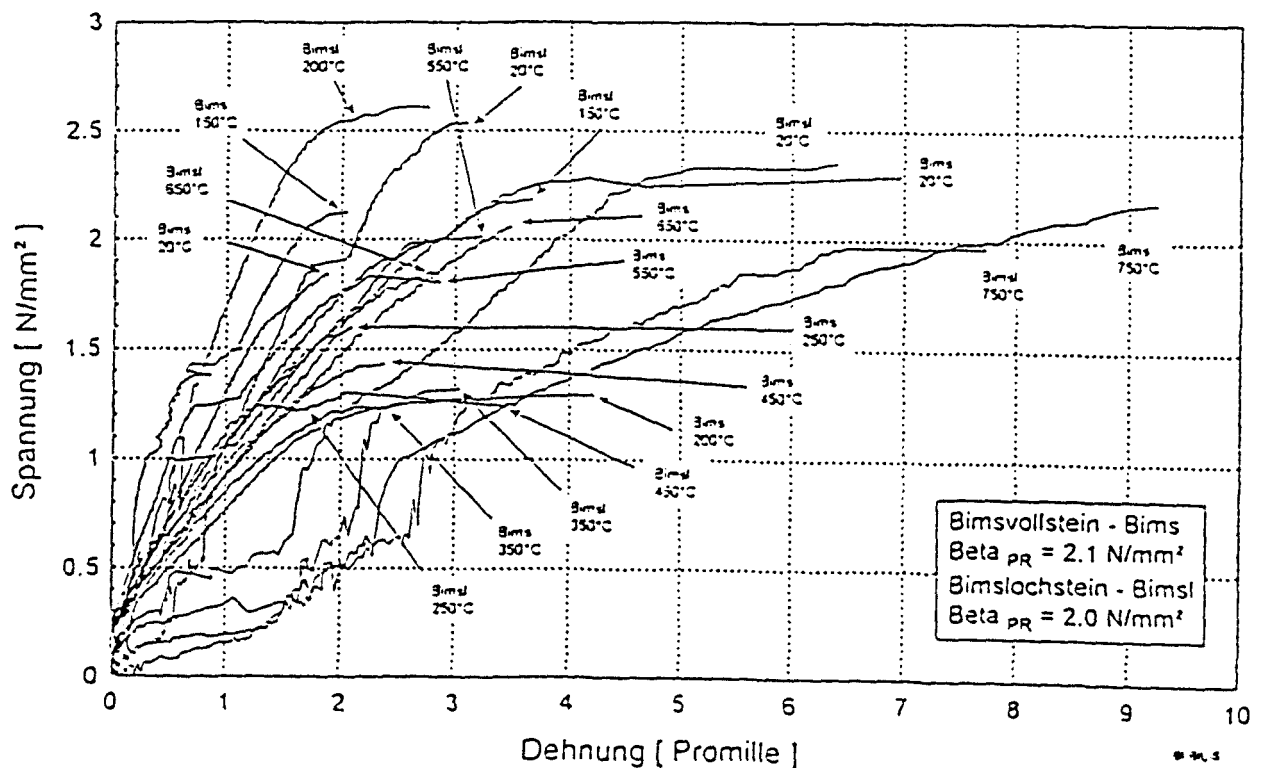


Bild 4.6:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche - Vergleich Vbl 2-0,7 und Hbl 2-0,5

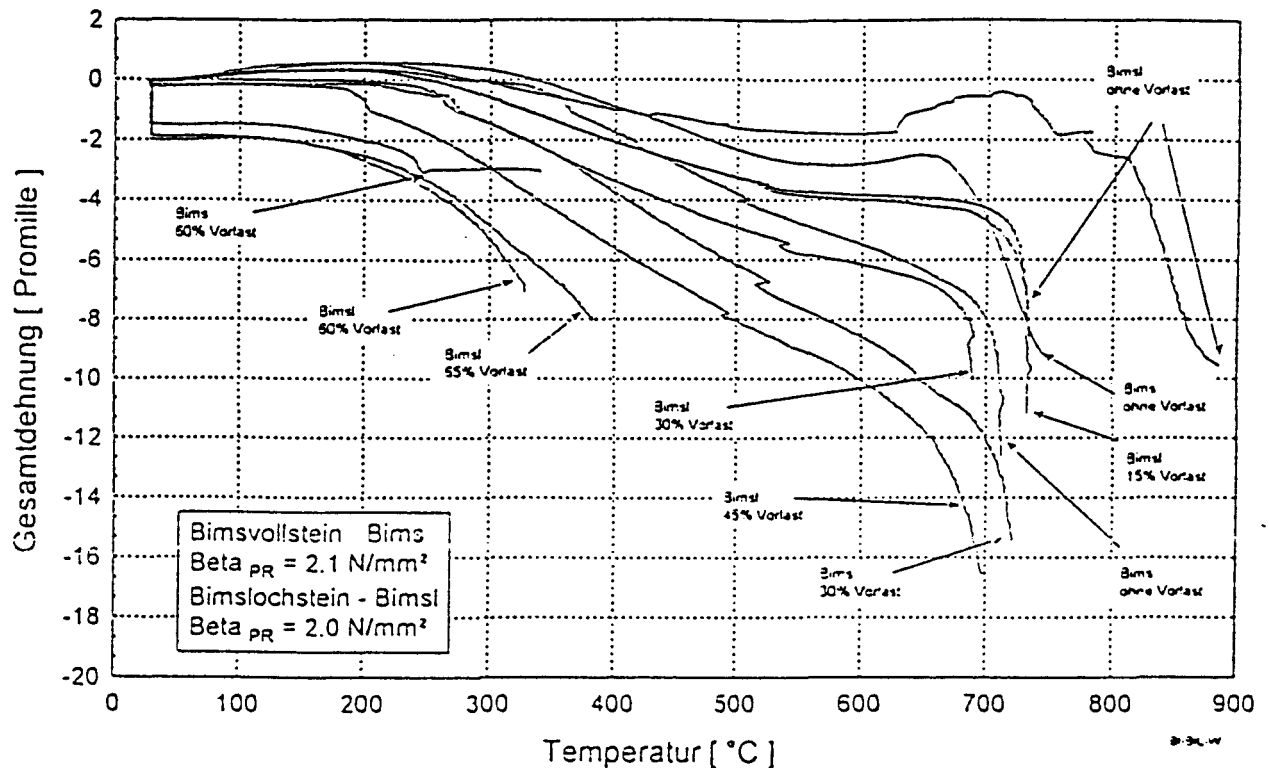


Bild 4.7: Thermische Dehnung  $\varepsilon_{th}$  und Gesamtdehnung  $\varepsilon_w$  bei unterschiedlicher Vorlast - Vergleich Vbl 2-0,7 und Hbl 2-0,5

Die  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Kurven sowohl für die Vollsteine als auch für die Lochsteine aus Bimsbeton weisen einige Unregelmäßigkeiten auf. Die Verformungskurven  $\varepsilon_{th}$  und  $\varepsilon_w$  für die Vollsteine und Lochsteine aus Bimsbeton passen von der Systematik gut zusammen.

Bei den  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Kurven ist festzustellen, daß ab einer Temperatur von etwa  $> 200 \text{ }^\circ\text{C}$  die aufnehmbare Spannung  $\sigma$  gegenüber dem  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -Wert des Probekörpers abnimmt und bei etwa  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  wieder zunimmt. Da die  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Kurven für die einzelnen Temperaturbereiche jedoch bisher keine Systematik aufweisen, kann eine abschließende Bewertung nicht erfolgen. Es sind lediglich Tendenzen erkennbar, die den bekannten Werten von Normalbeton ähneln.

Die Dehnungen bei 350 °C betragen etwa 2,5 - 3 ‰, bei 550 °C und 650 °C ebenso ca. 3 ‰ und bei 750 °C ca. 8 ‰. Die Dehnungen scheinen aufgrund der bisher vorliegenden Ergebnisse unabhängig von der Steifigkeit und vom Lochbild zu sein. Endgültige Rückschlüsse lassen sich aus den Kurven des Bildes 4.6 bisher nicht ziehen.

Die beiden Kurven der thermischen Dehnung ohne Vorlast verlaufen bei den Voll- und Lochsteinen aus Bimsbeton bis zur Versagenstemperatur von ca. 750 °C ähnlich. Die maximale Stauchung beträgt bei den geprüften Vollsteinen etwa 8 ‰, dagegen bei den Lochsteinen nur etwa 5 ‰.

Bis zu einer Vorlast von etwa 15 % des Ausgangswertes bei 20 °C treten bis etwa 300°C Dehnungen von etwa 1 ‰ auf; oberhalb von 300 °C nehmen die Stauchungen bis 550°C stark zu, bis 700°C treten dann nur noch relativ geringe Verformungen auf bis zur Versagenstemperatur von etwa 720°C - 750°C. Die maximalen Stauchungen betragen etwa 7 - 8 ‰.

Bei höheren Vorlasten treten bis etwa 200 °C nur geringe Stauchungen auf, die bis 700 °C in relativ große Stauchungen übergehen. Die Versagenstemperatur liegt bei etwa 700 °C. Die maximale Stauchung beträgt etwa 16 ‰. Bei Vorlasten von 60 % und 65 % trat ein Versagen der Proben bei Temperaturen von 250 °C bis 380 °C ein. Die maximale Stauchung betrug hierbei 7,5 ‰.

Auf Bild 4.7 sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Steinarten hinsichtlich der Versagenstemperaturen und hinsichtlich der dabei aufgetretenden Gesamtverformungen erkennbar.

#### 4.3.1.4 Untersuchungsergebnisse und Bewertung Mauerziegel

Es wurden Mauerziegel als Voll-Prismen Mz 8-1,0 und als Hochloch-Prismen Hlz 12-1,0 untersucht. Die Proben wurden bis 850°C aufgeheizt. In Bild 4.8 werden die Ergebnisse aus den  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche und in Bild 4.9 die Ergebnisse aus den Versuchen zur thermischen Dehnung  $\epsilon_{th}$  und zur Gesamtdehnung  $\epsilon_w$  im gleichen Maßstab grafisch zusammenfassend dargestellt. Die Einzelergebnisse können der Anlage 3.6 entnommen werden.

Die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurven der Vollziegel-Prismen und der Lochziegel-Prismen fallen sehr unterschiedlich aus. Dahingegen passen die Verformungskurven  $\epsilon_{th}$  und  $\epsilon_w$  für die jeweilige Steinarten von der Systematik relativ gut zusammen.

Bei den  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurven der Vollziegel-Prismen ist festzustellen, daß bis zu einer Temperatur von etwa 450 °C die aufnehmbare Spannung  $\sigma$  weit um den 25 °C-Wert des Probekörpers streut. Die Streubreite beim 25 °C-Wert beträgt jedoch bereits etwa 70 %. Ab einer Temperatur von etwa 550 °C nimmt die aufnehmbare Spannung gegenüber dem 25 °C-Wert zu. Die maximale aufnehmbare Spannung  $\sigma$  liegt bis zu etwa 100 % über dem Ausgangswert bei 25 °C. Diese Ergebnisse können jedoch nicht als vertrauenswürdig angesehen werden, weil die Ausgangsproben ("kalten Werte") bereits weit streuen, vgl. Abschnitt 3.1.1. Die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurven verlaufen bis zu einer Dehnung von 2,5 ‰ bis 3 ‰ etwa linear gehen dann in ein kurzes Plateau über, bevor sie zerbrechen.

Bei den  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurven der Lochziegel-Prismen ist festzustellen, daß bis zu einer Temperatur von etwa 550 °C die aufnehmbare Spannung  $\sigma$  etwa dem 20 °C-Wert des Probekörpers entspricht. Ab einer Temperatur von etwa 650 °C nimmt die aufnehmbare Spannung gegenüber dem 20 °C-Wert zu. Die maximale aufnehmbare Spannung  $\sigma$  liegt bis zu etwa 20 % über dem Ausgangswert bei 20 °C.



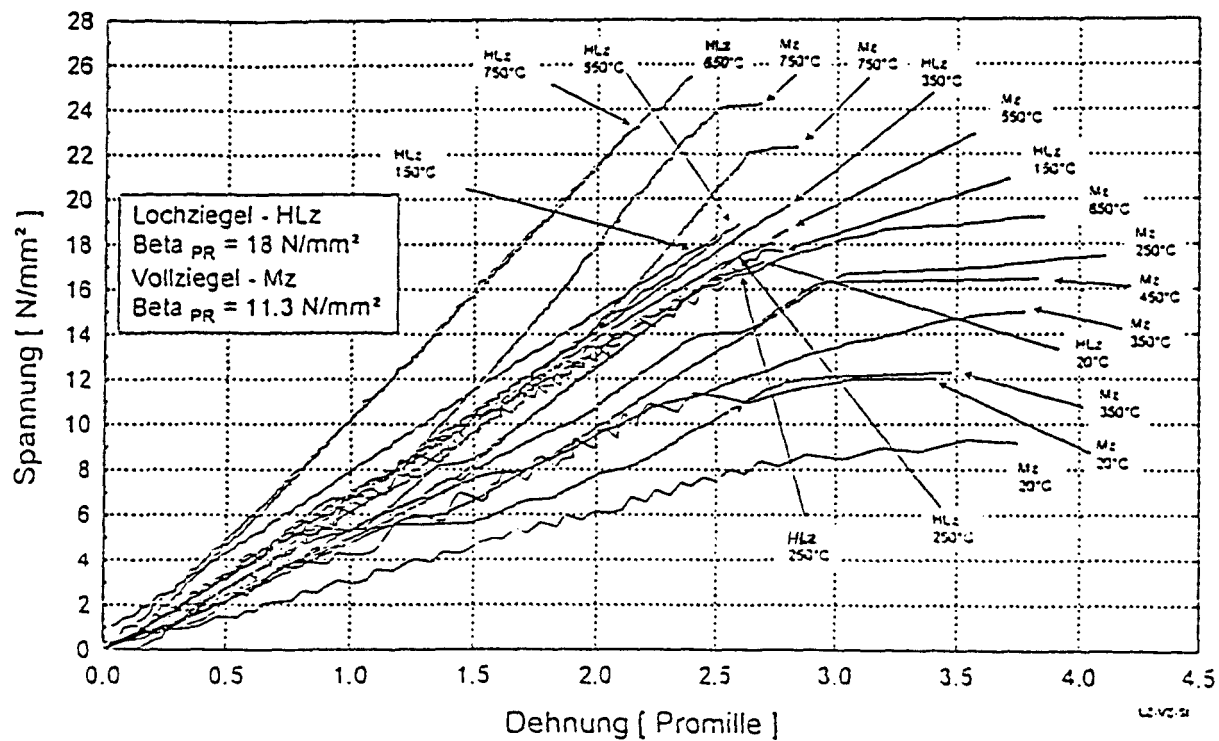


Bild 4.8: σ-ε-Versuche - Vergleich Mz 8-1,0 und Hlz 12-1,0

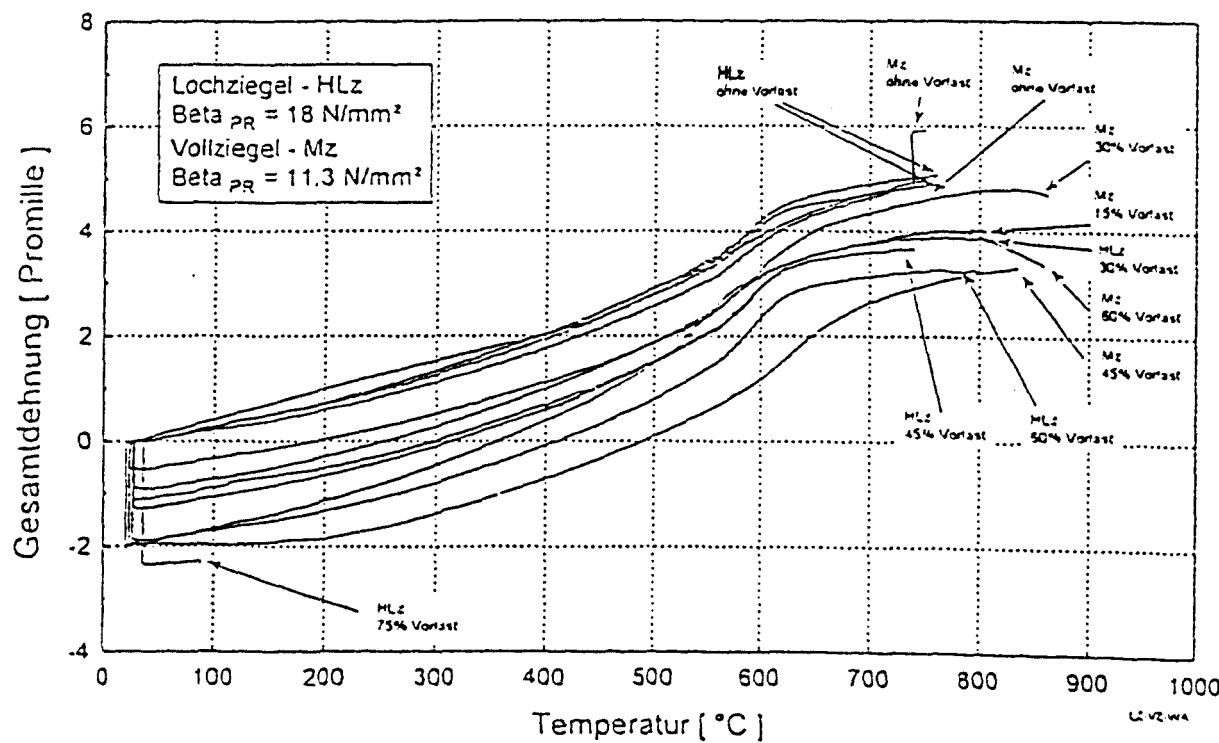


Bild 4.9: Thermische Dehnung ε<sub>th</sub> und Gesamtdehnung ε<sub>w</sub> bei unterschiedlicher Vorlast - Vergleich Mz 8-1,0 und Hlz 12-1,0

Die Kurven für 650 °C und 750 °C liegen dicht zusammen. Die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurven verlaufen bis zum plötzlichen Bruch linear. Die Proben sind jeweils explosionsartig zerbrochen.

Die große Streubreite der Vollziegel-Prismen ist deutlich erkennbar. Die Dehnungen der Vollziegel liegen etwa zwischen 2,6 ‰ bis 3,7 ‰. Die Dehnungen der Lochziegel liegen bis 550 °C etwa bei 2,7 ‰ bei 650 °C bei 2,4 ‰ und bei 750 °C bei 2,2 ‰. Die Dehnungen scheinen aufgrund der bisher vorliegenden Ergebnisse annähernd unabhängig von der Steinfestigkeit zu sein, wenn man die Plateaus bei den Vollziegeln nicht berücksichtigt.

Rückschlüsse auf den Einfluß des Lochanteils lassen sich aus den Kurven des Bildes 4.8 bisher nicht ziehen.

Die beiden Kurven der thermischen Dehnung ohne Vorlast verlaufen bei Mz und HLz bis zur Versagenstemperatur von ca. 750 °C der HLz nahezu gleich. Die maximale Dehnung beträgt sowohl bei den geprüften Mz 8-1,6 als auch bei den HLz 12-1,0 etwa 5,0 ‰.

Bei allen geprüften Vorlasten bis 60 % des Ausgangswertes bei 20 °C dehnen sich die Ziegel-Prismen bis etwa 600 °C stetig aus; Oberhalb 600 °C werden die Dehnungen geringer und nähern sich bis zum plötzlichen Bruch einem Plateau.

Bei einer Vorlast von 75 % des Ausgangswertes (Mittelwert) sind die Proben entweder beim Belasten gebrochen oder bei einer Temperatur < 100 °C; die Stauchung betrug etwa 2,4 ‰.

Im Bild 4.9 sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Steinarten hinsichtlich der Versagenstemperaturen und der Gesamtdehnungen erkennbar.

4.3.2 Mörtel

4.3.2.1 Untersuchungsergebnisse und Bewertung Leichtmörtel

Es wurden Leichtmörtel LM 21 und LM 36 untersucht. Die Proben wurden bis 850°C aufgeheizt. In Bild 4.10 werden die Ergebnisse aus den  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche und in Bild 4.11 die Ergebnisse aus den Versuchen zur thermischen Dehnung  $\epsilon_{th}$  und zur Gesamtdehnung  $\epsilon_w$  im gleichen Maßstab grafisch zusammenfassend dargestellt. Die Einzelergebnisse können der Anlage 3.7 entnommen werden.

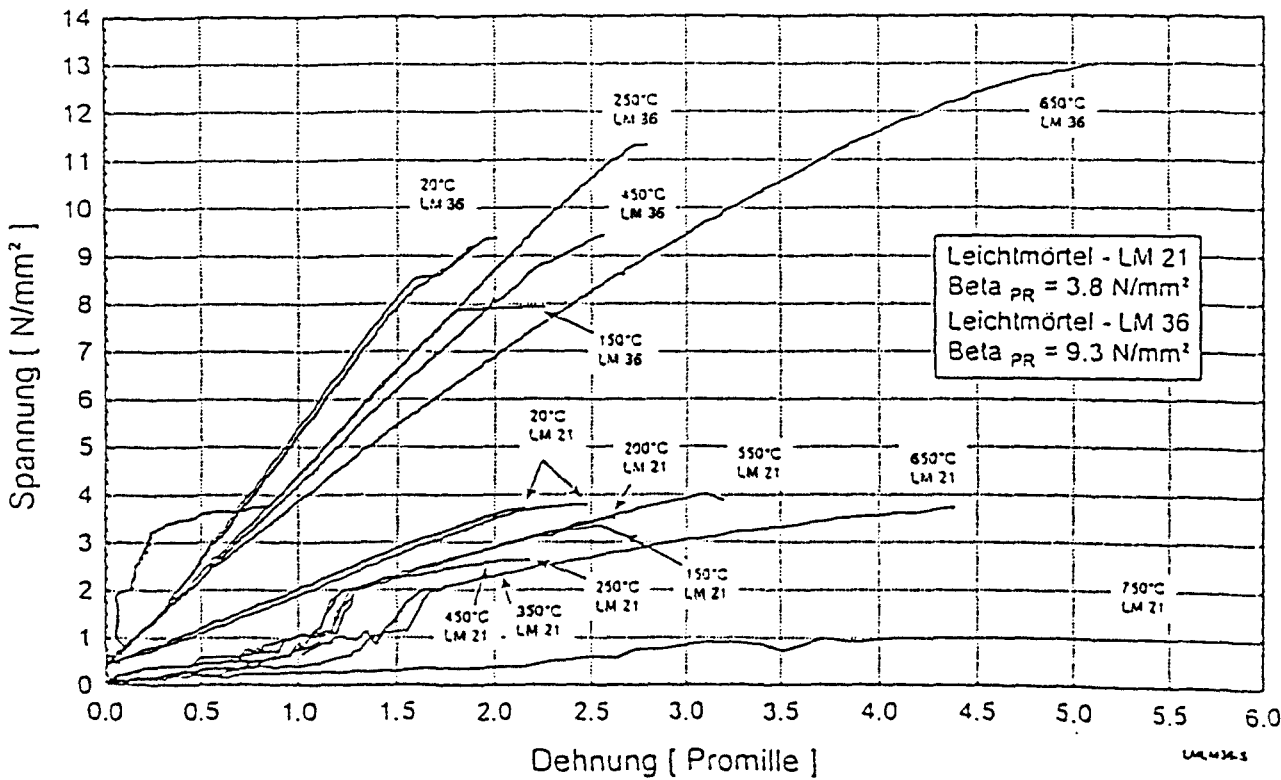


Bild 4.10:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche - Vergleich LM 21 und LM 36

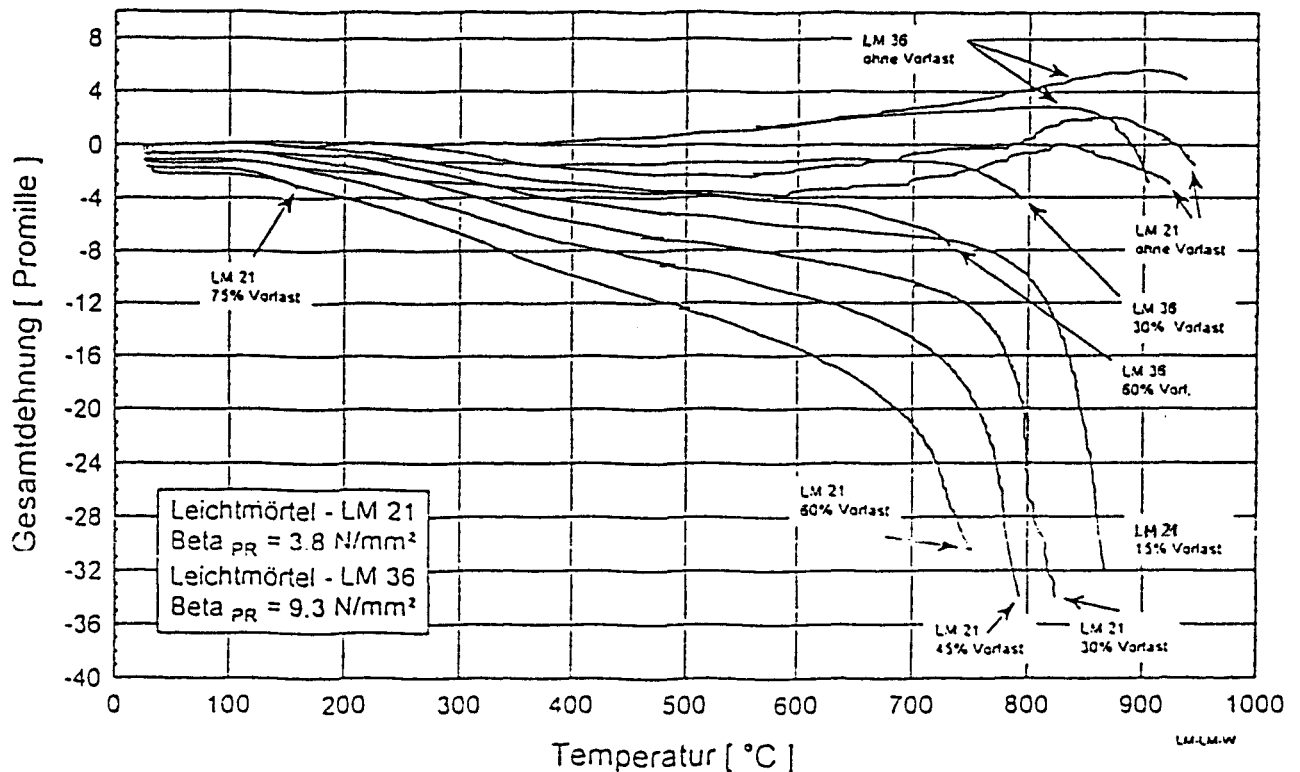


Bild 4.11: Thermische Dehnung  $\epsilon_{th}$  und Gesamtdehnung  $\epsilon_w$  bei unterschiedlicher Vorlast - Vergleich LM 21 und LM 36

Die ermittelten Werte für Leichtmörtel zeigen unterschiedliche Ergebnisse zwischen dem LM 21 und dem LM 36. Sie bestätigen damit die vorliegenden Prüferfahrungen aus Bauteil-Versuchen. Bei den wenigen Versuchen, die bisher durchgeführt wurden, ergaben sich mit LM 21 die geringsten Feuerwiderstandszeiten. In einigen Fällen trat auch ein vorzeitiges Tragversagen ohne Vorankündigung ein. Mit LM 36 ergaben sich i. d. R. etwas geringere Feuerwiderstandszeiten als mit Normalmörtel; in einigen jedoch auch ähnliche Werte.

Leichtmörtel wurde bisher jedoch nur in Verbindung mit Leichtbetonsteinen und Ziegeln geprüft. Dies beruht aber auch darauf, daß die Verwendung von Leichtmörtel mit Kalksandsteinen oder auch Porenbeton nicht sinnvoll bzw. nicht wirtschaftlich ist.

#### 4.3.2.2 Untersuchungsergebnisse und Bewertung Normalmörtel

Bei Normalmörtel konnte auf vorliegende Ergebnisse zurückgegriffen werden. So wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens [17] Rezeptmörtel NM IIIa und in Vorhaben des Sonderforschungsbereiches 148 Zementmörtel (NM IIa) im Vergleich zu Beton, die aufgrund ihrer Festigkeit jedoch ebenfalls als (NM IIIa) einzuordnen waren.

Die ausgewerteten Ergebnisse der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche bei 20 °C (Referenzversuch) und bei höheren Temperaturen sind im folgenden Bild 4.12 zusammengefaßt.

Die ausgewerteten Ergebnisse der thermischen Dehnung  $\epsilon_{th}$  sowie der Gesamtdehnung  $\epsilon_w$  sind im folgenden Bild 4.13 zusammengefaßt.

Bild 4.12:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche - Vergleich NM IIIa und (NM IIIa)

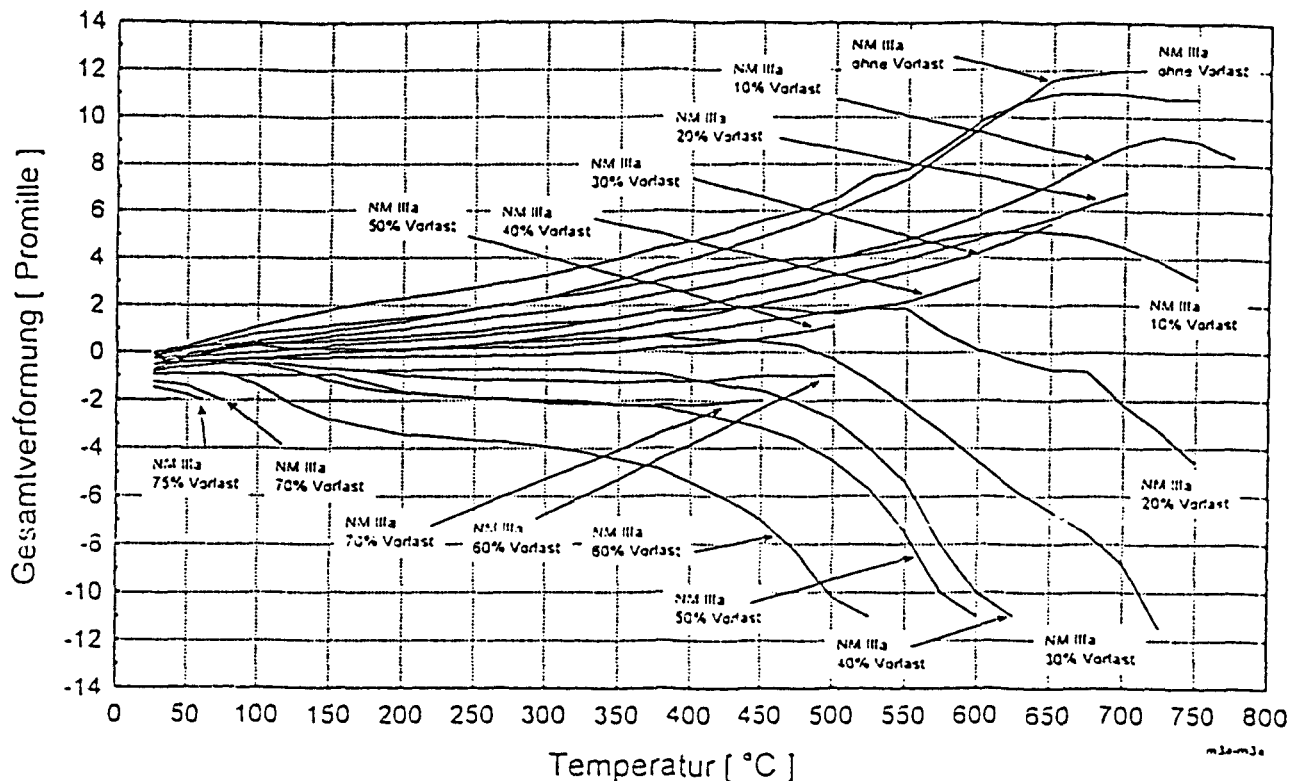


Bild 4.13: Thermische Dehnung  $\epsilon_{th}$  und Gesamtdehnung  $\epsilon_w$  bei unterschiedlicher Vorlast - Vergleich NM IIIa und NM IIIa

Der Verlauf der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurven entspricht dem bekannten Betonverhalten. Die Festigkeit nimmt bei erhöhten Temperaturen stetig ab.

Die Warmkriechkurven zeigen, daß sich der untersuchte Normalmörtel bis zu einer Vorlast von 10 % des Ausgangswertes bei 20 °C und bis zu einer Temperatur von 650 °C dehnt. Die maximale Dehnung beträgt 11 ‰. Bei 20 % und 30 % Vorlast tritt bis etwa 500 °C eine geringe Dehnung auf, danach eine zunehmende Stauchung. Bei höheren Vorlasten wird der Mörtel von 100 °C bis 200 °C stärker und dann bis etwa 350 °C schwächer gestaucht. Anschließend wachsen die Stauchungen stärker an und erreichen je nach Vorlast die maximale Stauchung von etwa 11 ‰ zwischen 500 °C und 700 °C.

#### 4.3.2.3 Bewertung von Dünnbettmörtel

Dünnbettmörtel wird in Mauerwerk i.d.R. mit Mörtelschlitten oder Zahnspachtel aufgebracht. Die Fugendicke beträgt 1 bis 3 mm.

Neuere Verfahren werden z.Zt. auf den Markt gebracht. Hierbei werden die Steine, z.B. Leichthochlochziegel, in den Mörtel getaucht und dann eingesetzt oder der relativ dünnflüssige Mörtel wird mit einer Rolle aufgebracht. Die Fugendicke beträgt bei diesen Verfahren nur noch etwa 1 mm.

Der Fugenanteil bei der Verwendung von Dünnbettmörtel ist so minimal, daß er vernachlässigbar ist und man eigentlich von einem homogenen Wandmaterial ausgehen kann. Diese Annahme wird sowohl durch Tragfähigkeitsversuche als auch durch die vorliegenden Brandprüfungen bestätigt. Zur Beurteilung von Mauerwerk mit Dünnbettmörtel können daher i.d.R. ausschließlich die Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften der Steine zugrunde gelegt werden. Ausgenommen hiervon sind Steine mit einem hohen Lochanteil und sehr filigranen Stegen, z.B. Leichthochlochziegel. Hier liegen unterschiedliche Prüfergebnisse mit z.T. frühzeitigen Versagen vor, deren Ursachen, soweit möglich, in den folgenden Abschnitten näher untersucht werden.

#### 4.4 Vergleichende Betrachtungen, Schlußfolgerungen, Wertung

##### 4.4.1 Vergleichende Betrachtungen

Im Rahmen der vergleichenden Betrachtungen werden einerseits die Untersuchungsergebnisse unterschiedlicher Mörtelsorten sowie unterschiedlicher Steinarten jeweils miteinander verglichen und andererseits werden Steinarten und Mörtelsorten gegenüber gestellt.

In den Bildern 4.14 und 4.15 werden die Ergebnisse der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche von Normalmörtel IIIa mit Leichtmörtel LM 21 und LM 36 verglichen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden zwei Bilder erstellt. Die Unterschiede sind deutlich erkennbar. Die Spannungs- und Dehnungswerte des LM 21 liegen im unteren Bereich und die des LM 36 im mittleren Bereich jeweils verglichen mit dem Normalmörtel IIIa.

Im Bild 4.16 werden exemplarisch die Ergebnisse der Warmkriechversuche von Leichtmörtel LM 36 mit Normalmörtel IIIa verglichen. Die Werte des LM 36 liegen etwa mittig im Wertebereich des Normalmörtels IIIa und liegen, verglichen mit dem Normalmörtel IIIa (Rezeptmörtel) wesentlich dichter beieinander.

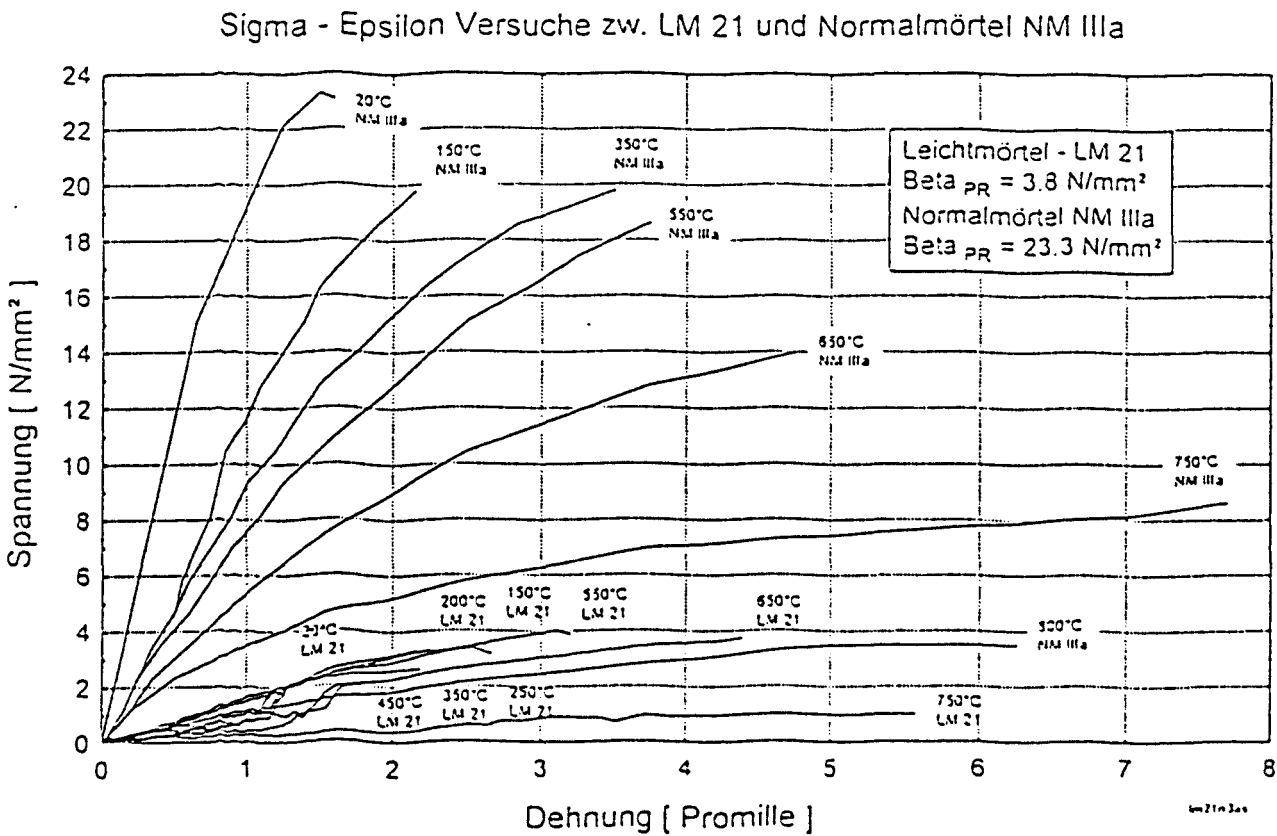


Bild 4.14:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche - Vergleich LM 21 / NM IIIa



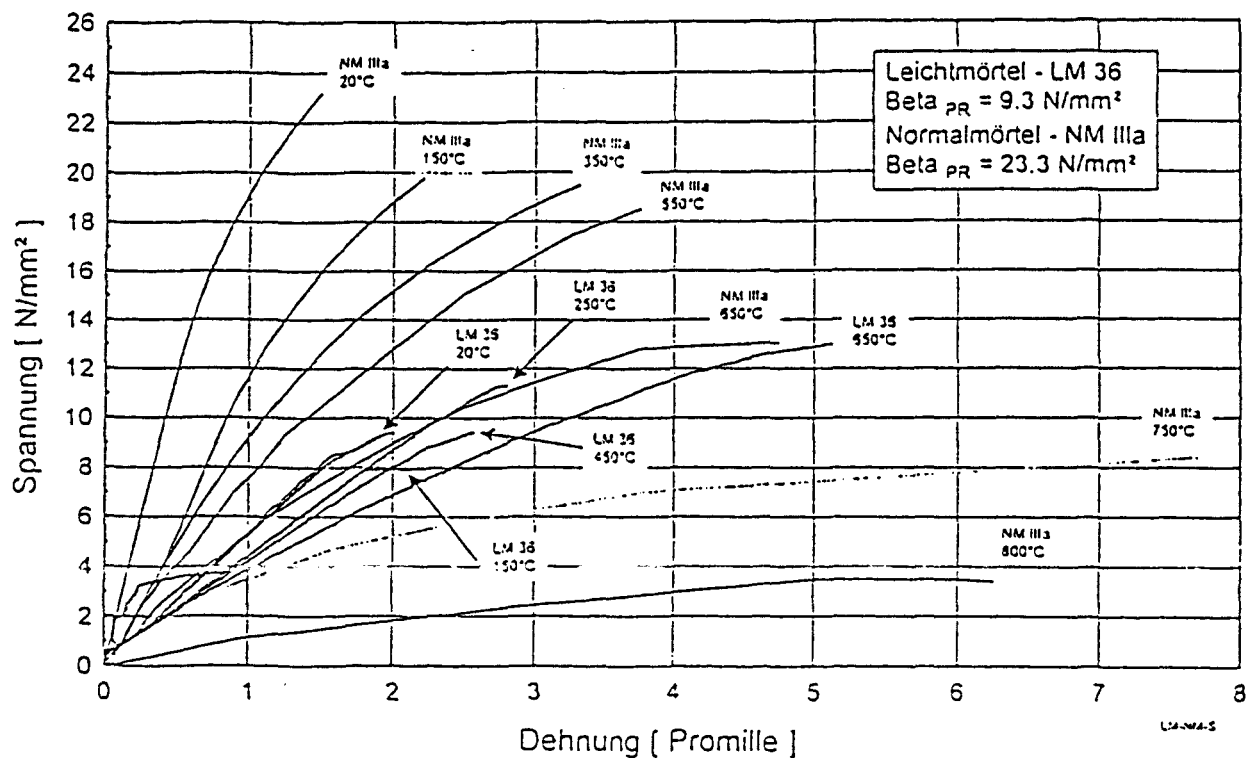


Bild 4.15: σ-ε-Versuche - Vergleich LM 36 / NM IIIa

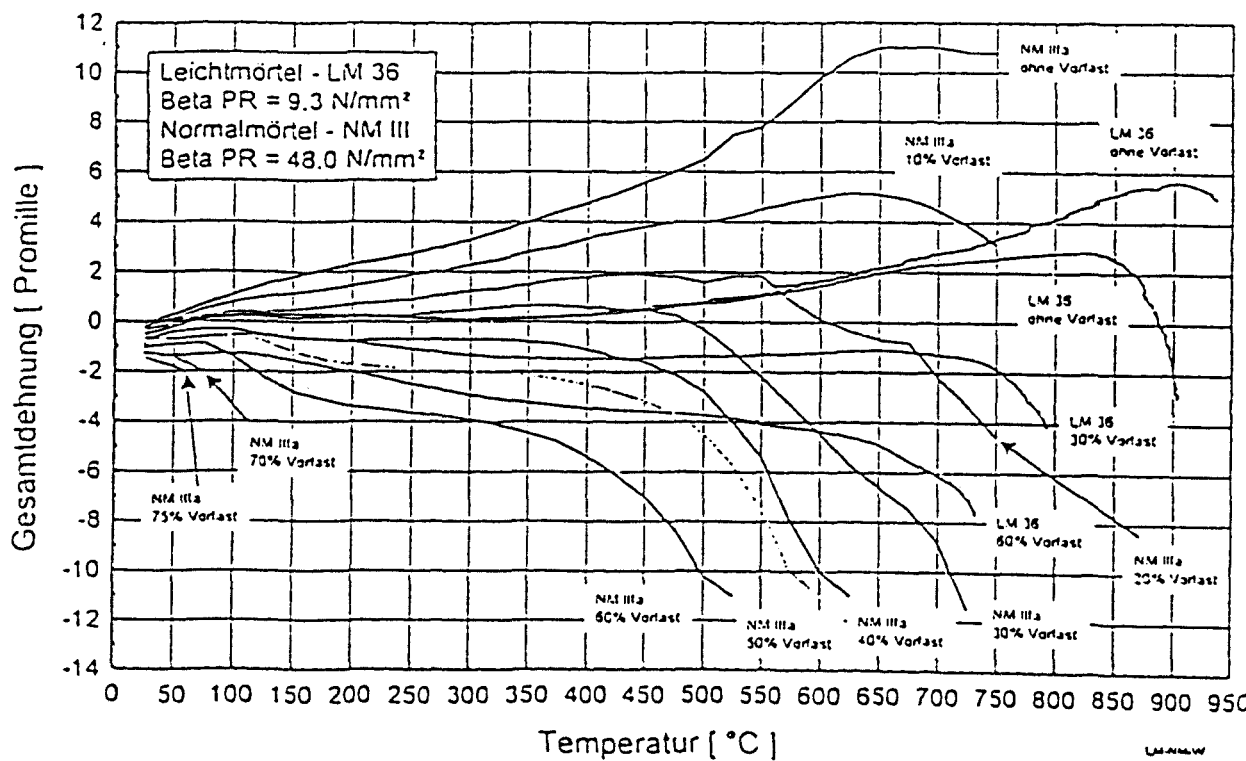


Bild 4.16: Warmkriechversuche - Vergleich LM 36 / NM IIIa

Es ist nicht möglich, alle Ergebnisse der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche und Warmkriechversuche aller untersuchten Steinarten und Mörtelsorten in einem Bild zusammenzufassen, weil die einzelnen Linien nicht mehr zuzuordnen sind.

#### 4.4.2 Schlußfolgerungen und Wertung

Betrachtet man die Bilder 4.1, 4.2 und 4.4 bis 4.13, so muß festgestellt werden, daß bei einem Spannungsbereich von 2 N/mm<sup>2</sup> bis 28 N/mm<sup>2</sup> Dehnungen von etwa + 11 ‰ bis - 18 ‰ auftreten.

In dem Bilder 4.17 werden exemplarisch die thermischen Dehnungen  $\epsilon_{th}$  aller untersuchten Steinarten und Mörtelarten zusammengefaßt. Aus diesem Bild wird deutlich, wie unterschiedlich sich die einzelnen Baustoffe von Mauerwerk unter Hochtemperaturbeanspruchung verhalten.

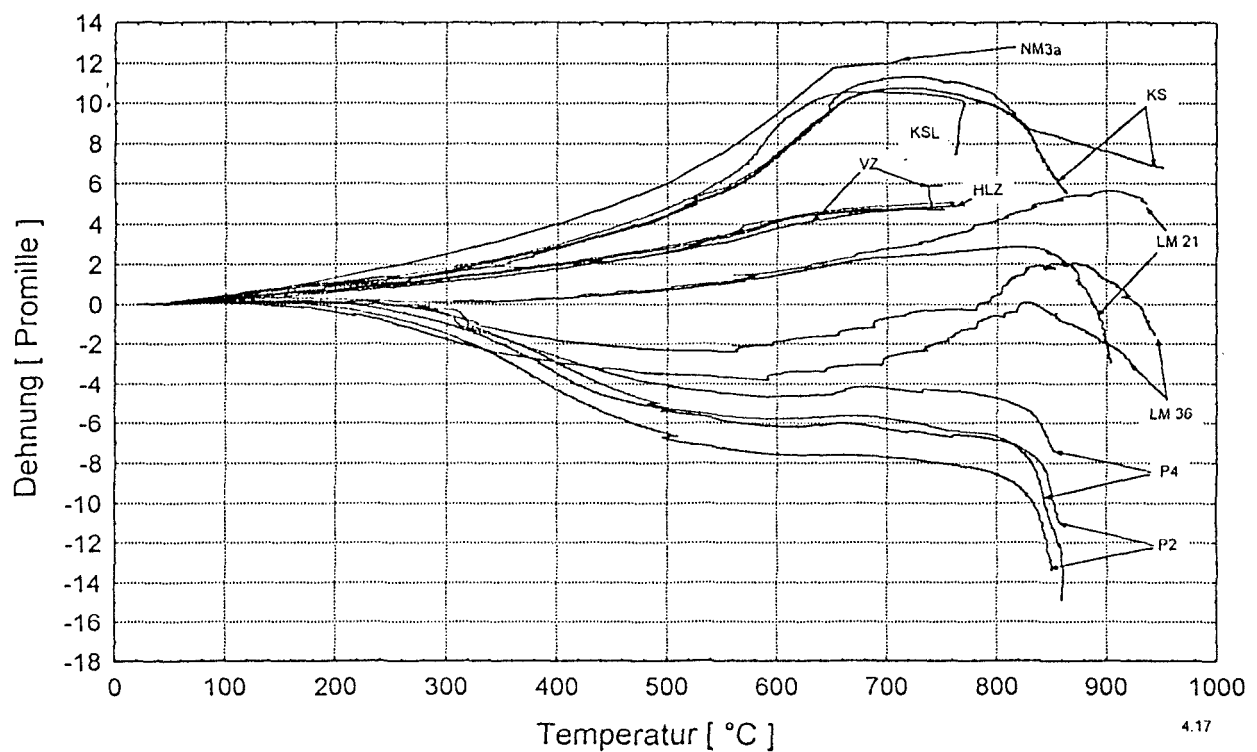


Bild 4.17: Thermische Dehnung  $\epsilon_{th}$  der Einzelbaustoffe Porenbeton, Leichtbeton, Kalksandstein, Ziegel und Leichtmörtel LM 21, LM 36 sowie Normalmörtel NM IIIa

Es ist deutlich erkennbar, daß sich nicht nur die einzelnen Steinarten, sondern auch die einzelnen Mörtelarten unterscheiden. Außerdem wird deutlich, daß je nach Kombination - Stein / Mörtel - andere Ergebnisse zu erwarten sind.

Mit diesen Ergebnissen wird bestätigt, daß zur Beurteilung des Brandverhaltens von Mauerwerk es nicht ausreichend sein kann, nur das Hochtemperaturverhalten der Einzelbaustoffe zu bewerten, sondern auch das Zusammenwirken von Stein und Mörtel zu kennen. Der Einfluß kann sehr unterschiedlich sein.

Aus den o.a. Gründen wurden daher auch Untersuchungen an Mauerwerksabschnitten, sogenannten Rilem-Körpern, durchgeführt, vgl. Abschnitt 5.

Außerdem wird die Erkenntnis aus den Bauteilprüfungen bestätigt, daß es nicht sinnvoll und wirtschaftlich ist, nur das Brandverhalten von allgemein Mauerwerk zu bestimmen, sondern das Brandverhalten in Abhängigkeit von den Einzelbaustoffen zu ermitteln. Dieses hat zur Folge, daß aufgrund der Datenfülle sehr differenziert gearbeitet werden muß.



## 5 MAUERWERKSABSCHNITTE UNTER HOCHTEMPERATUR- BEANSPRUCHUNG

### 5.1 Allgemeines

Da weltweit noch keine Untersuchungen zu den thermischen und mechanischen Materialeigenschaften von Mauerwerk vorliegen und das Trag- und Brandverhalten von Mauerwerk nicht nur durch die Einzelbaustoffe sondern auch durch das Zusammenwirken von Stein und Fuge bestimmt wird, wurden erstmals Mauerwerksabschnitte unter Hochtemperaturbeanspruchung untersucht.

Diese Versuche mit definierten Randbedingungen sollten dazu dienen, das zu entwickelnde Rechenverfahren zu verifizieren. Es sollten hiermit keine Materialgesetze speziell für Mauerwerk entwickelt werden.

Zur Durchführung der Untersuchungen wurde eine Prüfmaschine auf der Grundlage der vorhandenen Baustoffprüfmaschinen entwickelt und im wesentlichen mit vorhandenen Eigenmitteln gebaut. In die einaxiale Prüfmaschine können sog. RILEM-Körper mit den Abmessungen Länge x Breite x Höhe = 750 mm x Steindicke x 1000 mm eingebaut und mit 2 K/min elektrisch erwärmt werden. In Vorversuchen wurde die Heizung so abgestimmt, daß sich ein möglichst kleiner Temperaturgradient über die Höhe ergab, der Vernachlässigbar ist. Die Temperaturverteilung innerhalb der Probekörper wurde gemessen; die Ergebnisse können den Forschungsberichten [13, 14, 15 16] entnommen werden. Die Versuche zur Bestimmung der thermischen Dehnung und der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Werte wurden jeweils erst dann abgeschlossen, wenn sich kaum noch Temperaturveränderungen innerhalb der Querschnitte zeigten.

Die Prüfmaschine ist auf eine maximale Belastung von 140 kN ausgelegt, das entsprach in Abhängigkeit vom Probekörper einem Ausnutzungsfaktor von 0,06 bis  $0,7 \cdot \beta_R$  Probekörper. Die Prüfmaschine ist in Anlage 4.1 dargestellt. Die Probekörper sind in der Anlage 4.2 dargestellt.

Es können Versuche zur Ermittlung der thermischen Dehnung  $\epsilon_{th}$  und der Gesamtdehnung  $\epsilon_w$  durchgeführt werden.

## 5.2 Durchgeführte Untersuchungen

### 5.2.1 Thermische Dehnungen $\epsilon_{th}$

Zur Untersuchung der thermischen Dehnungen  $\epsilon_{th}$  wurden die Probekörper in die Prüfmaschine eingebaut und aufgeheizt. Zur Lagesicherung wurden die Probekörper mit dem Belastungsgerüst gehalten. Die Wege im Belastungsgerüst wurden frei gegeben, so daß eine freie Verformung möglich war. Während der Versuchsdauer wurden waagerechte und senkrechte Verformungen des Probekörpers mit Quarzglasstäben aufgenommen und an Wegaufnehmer weitergeleitet. Außerdem wurde die Temperaturverteilung innerhalb des Wandquerschnittes in halber Höhe festgehalten. Die Bilder der Anlage 4.2 zeigen die Lage der Verformungsmeßstellen und die Lage der Temperaturelemente.

Für Mauerwerk aus Porenbeton, Kalksandsteinen, Leichtbeton und Ziegel wurden die thermischen Dehnungen untersucht. Hierfür wurden RILEM-Körper aufgemauert und nach einer Trocknungszeit von mindestens 4 Wochen untersucht. Der Normalmörtel NM IIa wurde nach DIN 1053 Teil 1 Tabelle A.1 angemischt. Als Dünnbettmörtel wurde Werk trockenmörtel verwendet.

Die Wände wurden je nach Steinsorte mit vermörtelter oder unvermörtelter Stoßfuge ausgeführt. Die Probekörper waren jeweils als gebräuchlichste Mauerwerksart in Abstimmung mit den jeweiligen Steinindustrien errichtet.

Die Kennwerte der Probekörper sind der Tabelle der Anlage 4.3 zu entnehmen.

### 5.2.2 Gesamtdehnungen $\epsilon_w$ (sog. Warmkriechversuche)

Die Probekörper wurden entsprechend den Angaben von Abschnitt 5.2.1 errichtet und in die Prüfmaschine eingebaut. Abweichend von Abschnitt 5.2.1 wurden die Probekörper mit der maximal möglichen Auflast von 140 kN belastet.

Die Versuchsdurchführung und die Messungen entsprachen den o.a. Angaben.

## 5.3 Untersuchungsergebnisse und Bewertung

### 5.3.1 Mauerwerksabschnitte aus Porenbeton

Es wurden Mauerwerksabschnitte aus 115 mm und 175 mm dicken Porenbetonsteinen errichtet. Die Probekörper, die mit Dünnbettmörtel gemauert wurden, hatten unvermörtelte Stoßfugen. Der Normalmörtel wurde in Stoß- und Lagerfugen aufgebracht. Es wurden Porenbetonsteine P2-0,5 und P4-0,6 verwendet.

Die Einzelergebnisse der Versuche zur thermischen Dehnung  $\epsilon_{th}$  und zu den Warmkriechversuchen  $\epsilon_w$  für die Mauerwerksabschnitte aus Porenbetonsteinen P2-0,5 und P4-0,6 mit Dünnbettmörtel bzw. Normalmörtel sind in [14] grafisch dargestellt. Es werden die gemessenen Verformungen in senkrechter und horizontaler Richtung sowie im Bereich der Fugen, jeweils nach den Probekörpern geordnet, zusammengefaßt. Außerdem sind die Temperaturverteilung in der Prüfmaschine sowie die Temperaturen im Probekörper grafisch dargestellt.

In den Bildern 5.1 - 5.5 werden jeweils für die thermische Dehnung und die Warmkriechversuche die einzelnen Verformungsmessungen für Porenbetonsteine P2-0,5 und P4-0,6 zusammengefaßt und gegenübergestellt.

Die durchgeführten Untersuchungen an Mauerwerksabschnitten haben gezeigt, daß mit dem gewählten Untersuchungsverfahren insbesondere das Zusammenwirken von Porenbeton und verschiedenen Mörteln studiert werden kann.

Es liegen erste Ergebnisse zur Gesamtverformung sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung von unbelasteten und maximal mit  $F = 140 \text{ kN}$  belasteten Proben vor. Das Prüfgestell war nicht für größere Lasten bemessen, da im ersten Schritt zunächst die Tauglichkeit der gewählten Untersuchungsmethode erprobt werden mußte.

Zusammenfassend kann für die thermische Dehnung in vertikaler Richtung gesagt werden, daß bis zu einer Temperaturerhöhung von  $250 \text{ °C}$  die Dehnungen leicht zunehmen, von  $250 \text{ °C}$  bis  $400 \text{ °C}$  gehen die Dehnungen auf den Ausgangswert zurück. Danach wird die Verformungskurve steiler und bis etwa  $700 \text{ °C}$  wird das Maximum der Stauchung erreicht. Die thermische Dehnung in horizontaler Richtung nimmt bis etwa  $550 \text{ °C}$  zu und fällt dann bis  $700 \text{ °C}$  auf etwa die Hälfte. Bei den Warmkriechversuchen ist ein Einfluß der Mörtelart erkennbar. Beim Mauerwerk mit Normalmörtel sind die vertikalen Stauchungen geringer gegenüber dem Mauerwerk mit Dünnbettmörtel. Die horizontalen Dehnungen sind dagegen - wie zu erwarten - beim Mauerwerk mit Normalmörtel gegenüber Mauerwerk mit Dünnbettmörtel größer.

Vergleicht man die Dehnungen der Porenbetonsteine mit den Mauerwerksabschnitten, so liegen die Ergebnisse für die Einzelsteine innerhalb des Streubereiches der Mauerwerksabschnitte.



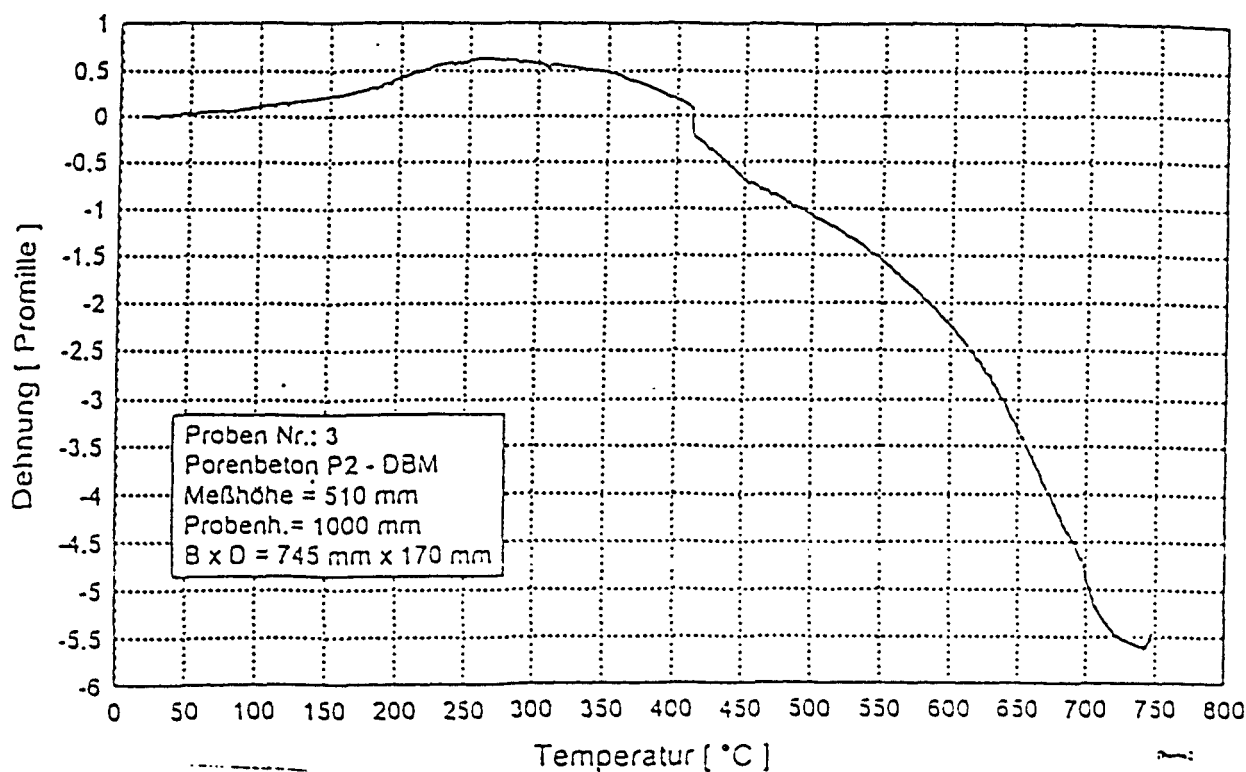


Bild 5.1: Thermische Dehnung - vertikale Verformung  
P2-0,5 / Dünnbettmörtel

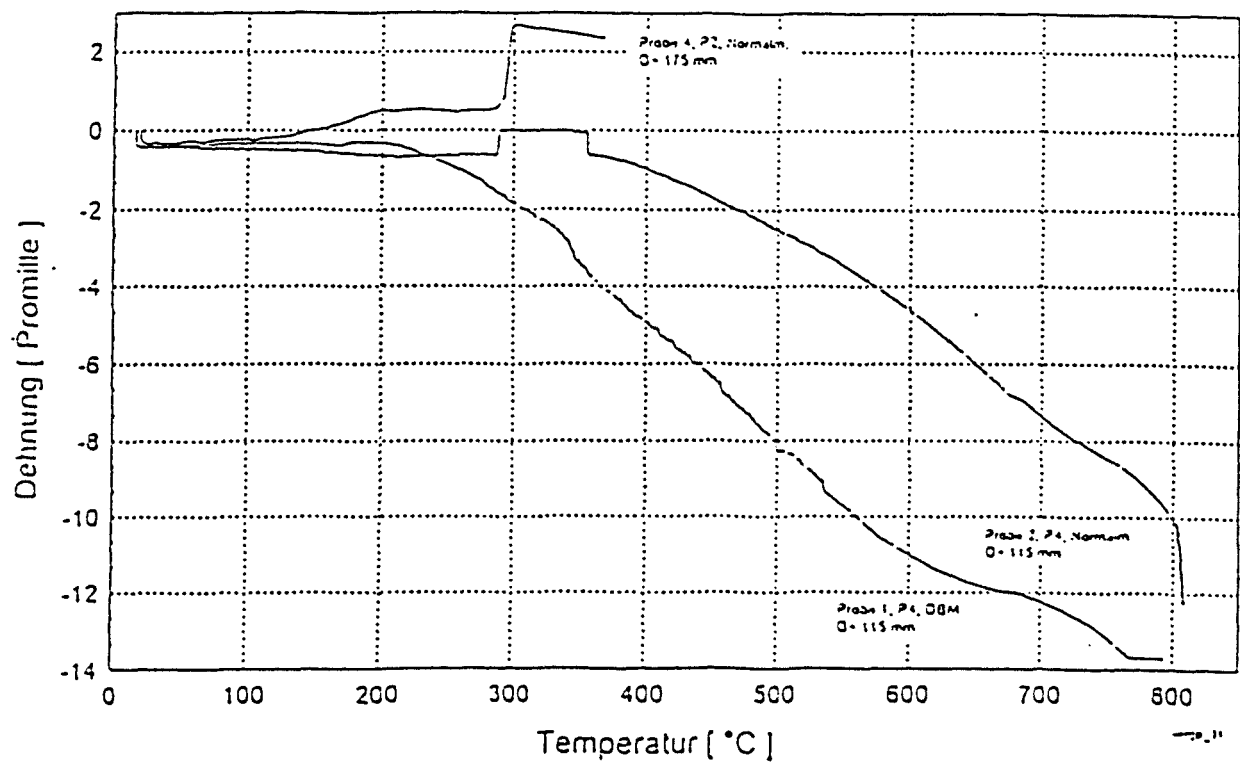


Bild 5.2: Warmkriechversuche - vertikale Verformung  
P2-0,5 - P4-0,6 / Dünnbettmörtel-Normalmörtel

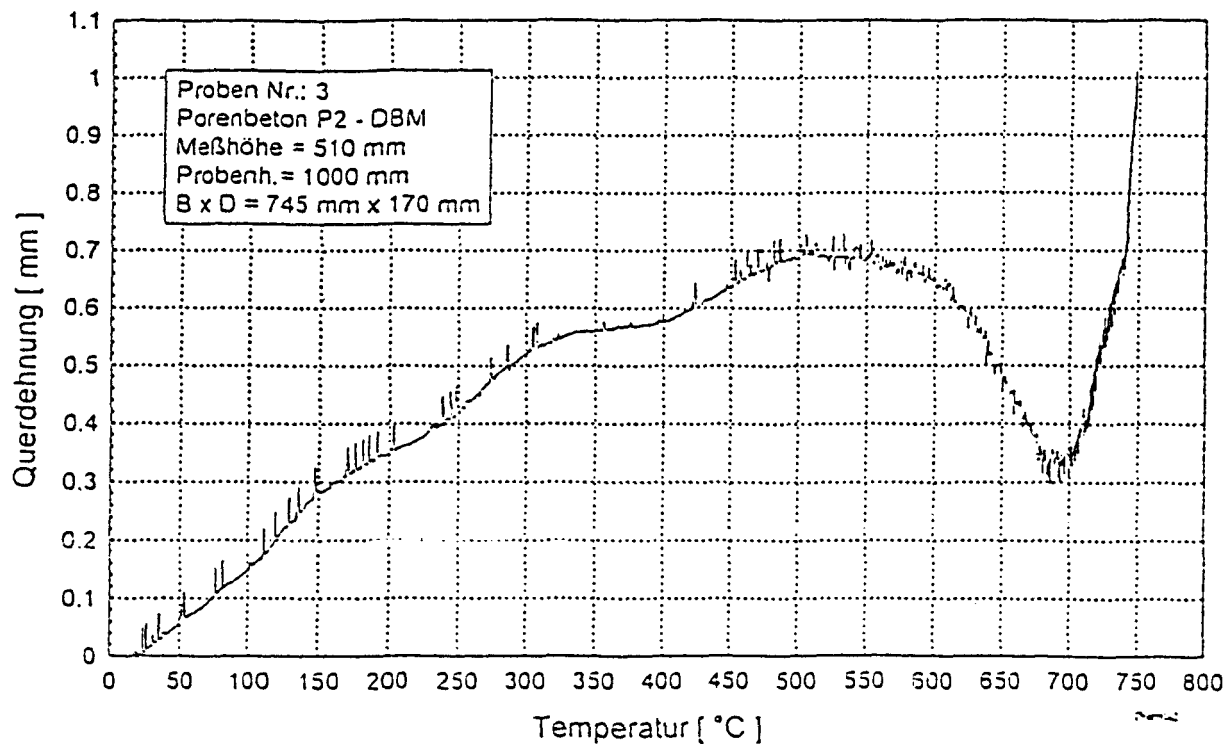


Bild 5.3: Thermische Dehnung - horizontale Dehnung  
P2-0,5 / Dünnbettmörtel

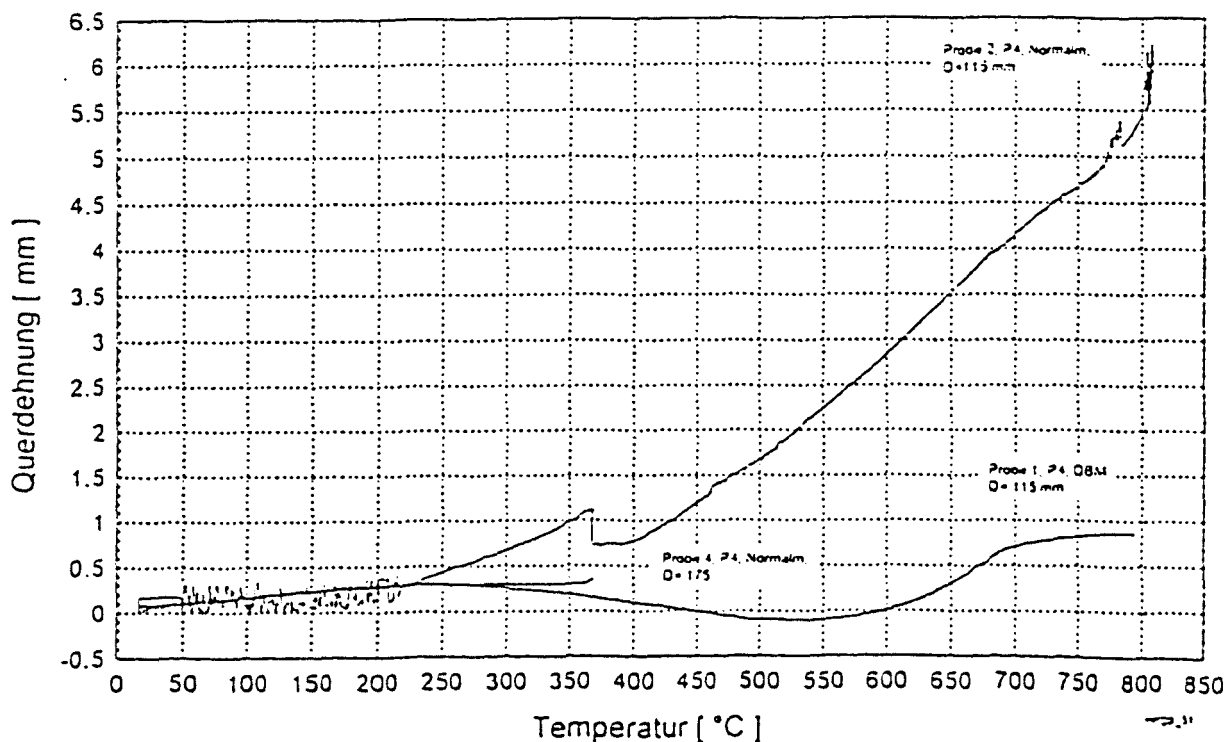


Bild 5.4: Warmkriechversuche - horizontale Dehnung  
P2-0,5 - P4-0,6 / Dünnbettmörtel-Normalmörtel

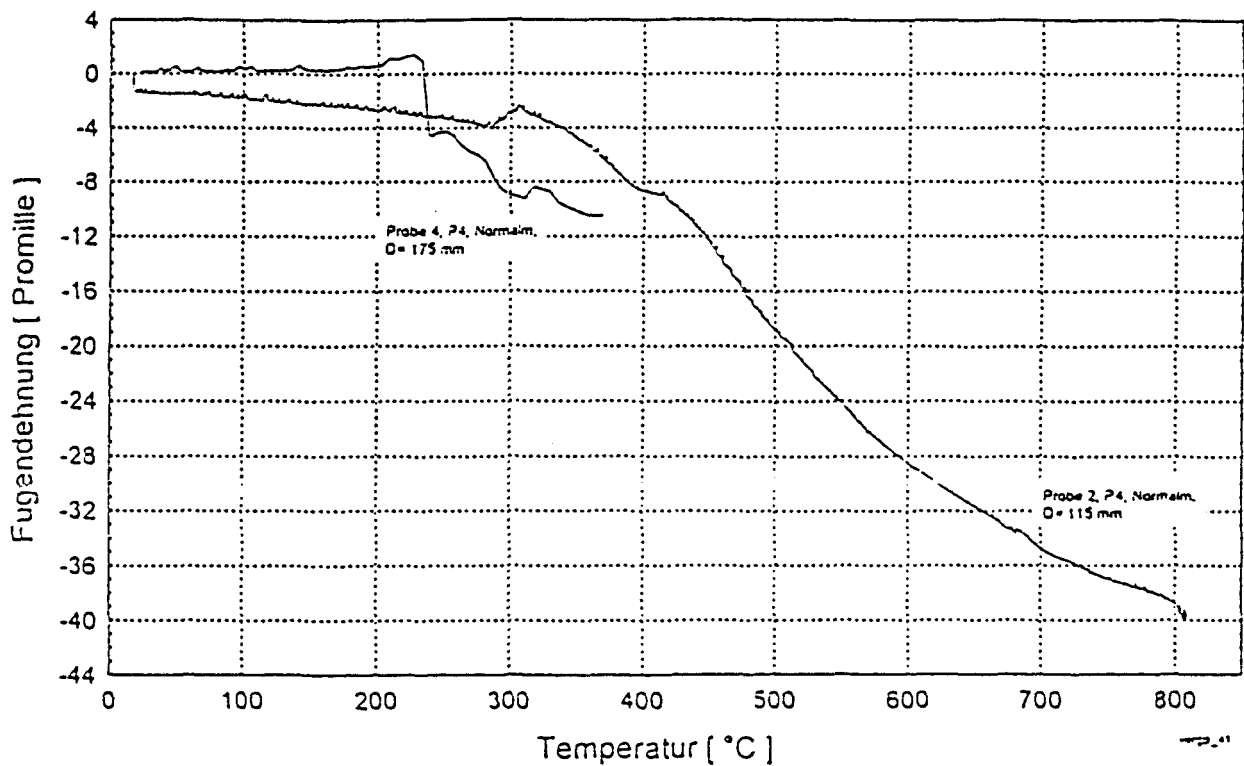


Bild 5.5: Warmkriechversuche - Stoßfugendehnung  
 P2-0,5 - P4-0,6 / Dünnbettmörtel

### 5.3.2 Mauerwerksabschnitte aus Kalksandstein

Es wurden Probekörper mit 115 mm, 150 mm und 175 mm Wanddicke aus Kalksandvoll- und Kalksandlochstein jeweils mit Dünnbettmörtel in den Lagerfugen (Stoßfugen unvermörtelt) oder mit Normalmörtel in Stoß- und Lagerfugen erstellt.

Die Probekörper sind in der Tabelle der Anlage 4.3 zusammengefaßt.

Die Untersuchungsarten und die Durchführung der Untersuchungen wurden in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Die Einzelergebnisse der gemessenen Verformungen in senkrechter und horizontaler Richtung sowie im Bereich der Fugen bei thermischer Dehnung  $\epsilon_{th}$  und bei den Warmkriechversuchen  $\epsilon_w$  für die Mauerwerksabschnitte aus Kalksandvoll- bzw. lochsteinen mit Dünnbettmörtel bzw. Normalmörtel sind in [13] jeweils nach den Probekörpern geordnet grafisch dargestellt. Außerdem sind die Temperaturverteilung in der Prüfmaschine sowie die Temperaturen im Probekörper grafisch dargestellt.

In den Bildern 5.6 - 5.11 werden jeweils für die thermische Dehnung und die Warmkriechversuche die einzelnen Verformungsmessungen für Kalksandvoll - und lochstein zusammengefaßt und gegenübergestellt.

Zusammenfassend kann für alle Verformungen gesagt werden, daß bis zu einer Temperaturerhöhung von 300 °C die Dehnungen leicht zunehmen, von 350 °C bis 600 °C wird die Neigung der Dehnungskurven steiler und danach bis etwa 700 °C wird das Maximum der Dehnung, z. T. verdoppeln sich die Dehnungen nochmals, erreicht.

Alle Verformungsmessungen bestätigten, daß bei Mauerwerk mit Normalmörtel größere Verformungen als bei Mauerwerk mit Dünnbettmörtel auftreten.

Vergleicht man die Dehnungen der Kalksandsteine mit den Mauerwerksabschnitten, so liegen die Ergebnisse für die Einzelsteine innerhalb des Streubereiches der Mauerwerksabschnitte.

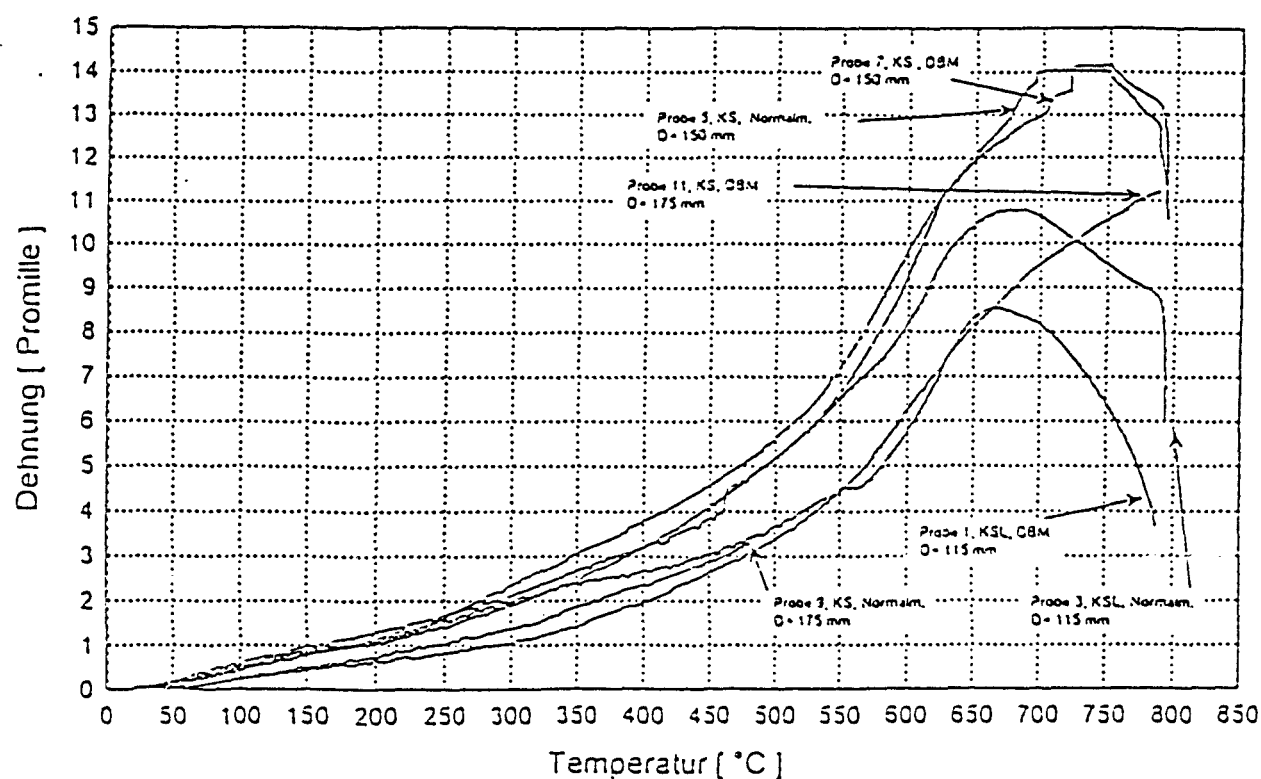


Bild 5.6: Thermische Dehnung - vertikale Verformung  
Vergleich KS - KSL/Dünnbettmörtel - Normalmörtel

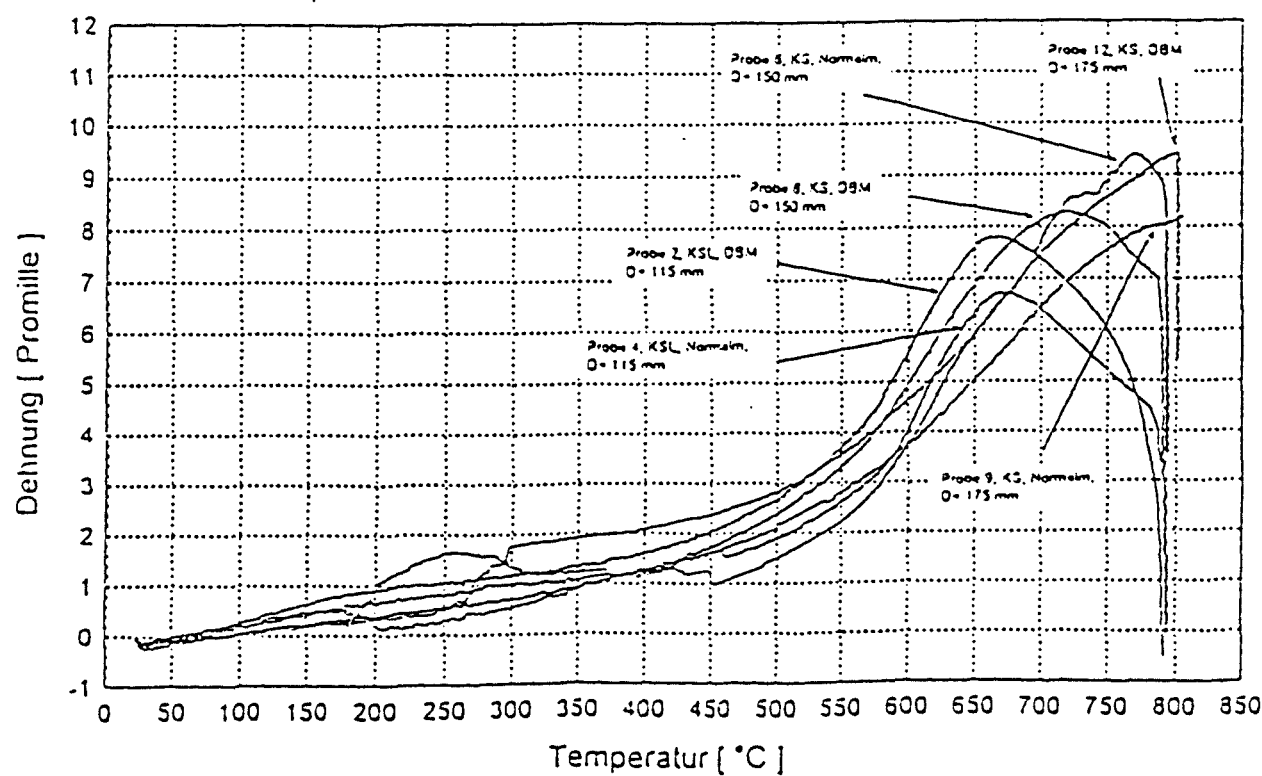


Bild 5.7: Warmkriechversuche - vertikale Verformung  
Vergleich KS - KSL/Dünnbettmörtel - Normalmörtel

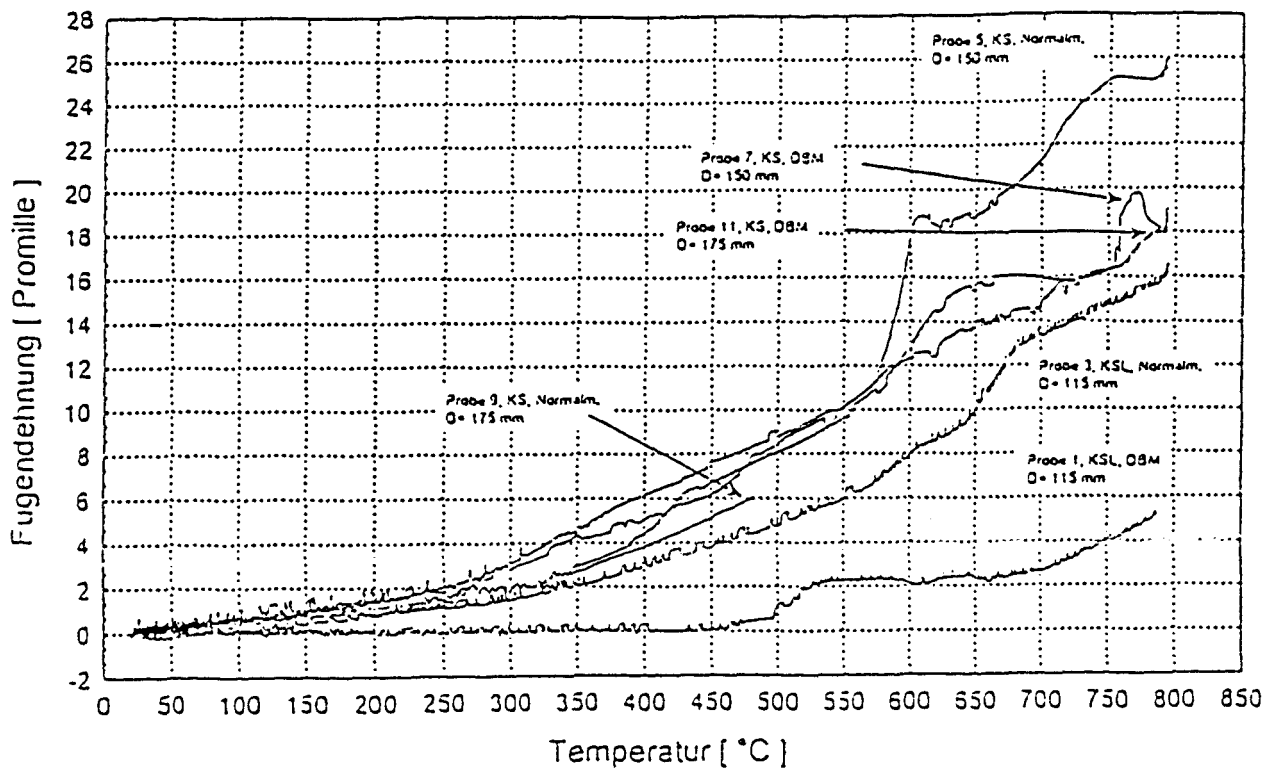


Bild 5.8: Thermische Dehnung - horizontale Dehnung  
Vergleich KS - KSL/Dünnbettmörtel - Normalmörtel

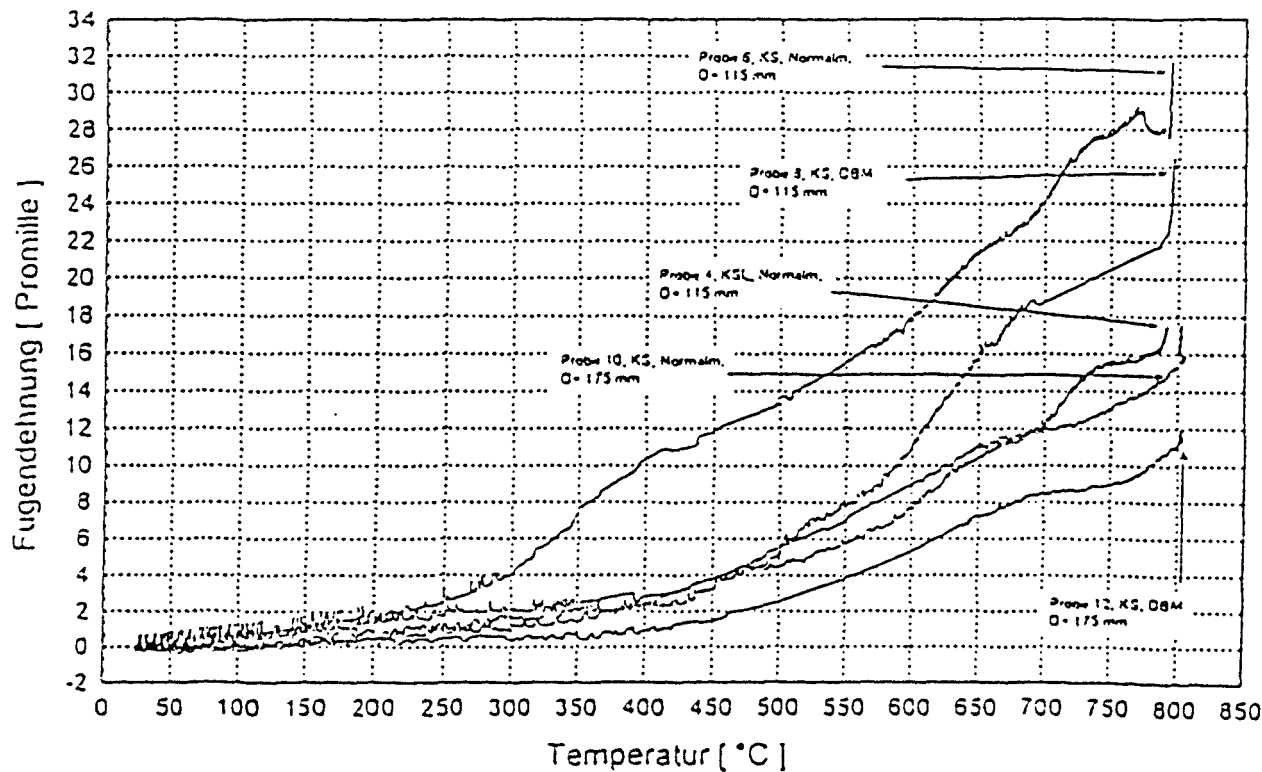


Bild 5.9: Warmkriechversuche - horizontale Dehnung  
Vergleich KS - KSL/Dünnbettmörtel - Normalmörtel

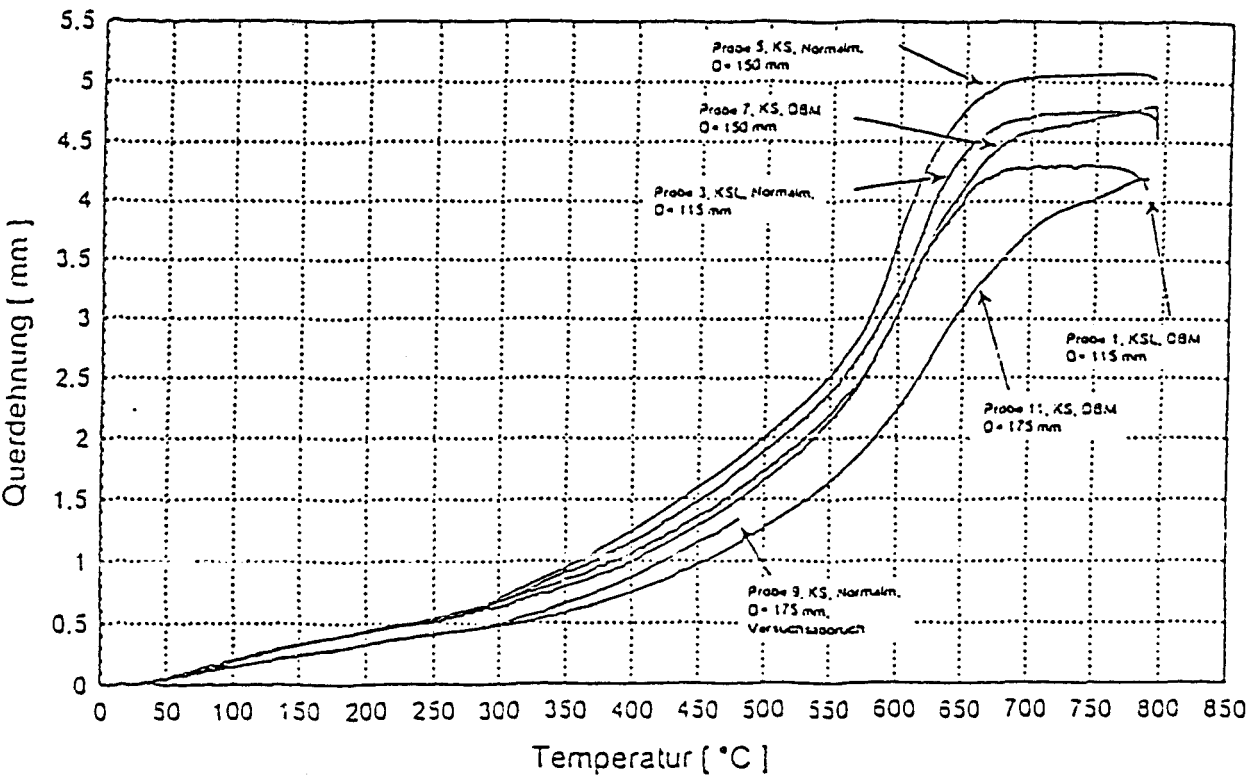


Bild 5.10: Thermische Dehnung - Stoßfugendehnung  
Vergleich KS - KSL/Dünnbettmörtel - Normalmörtel

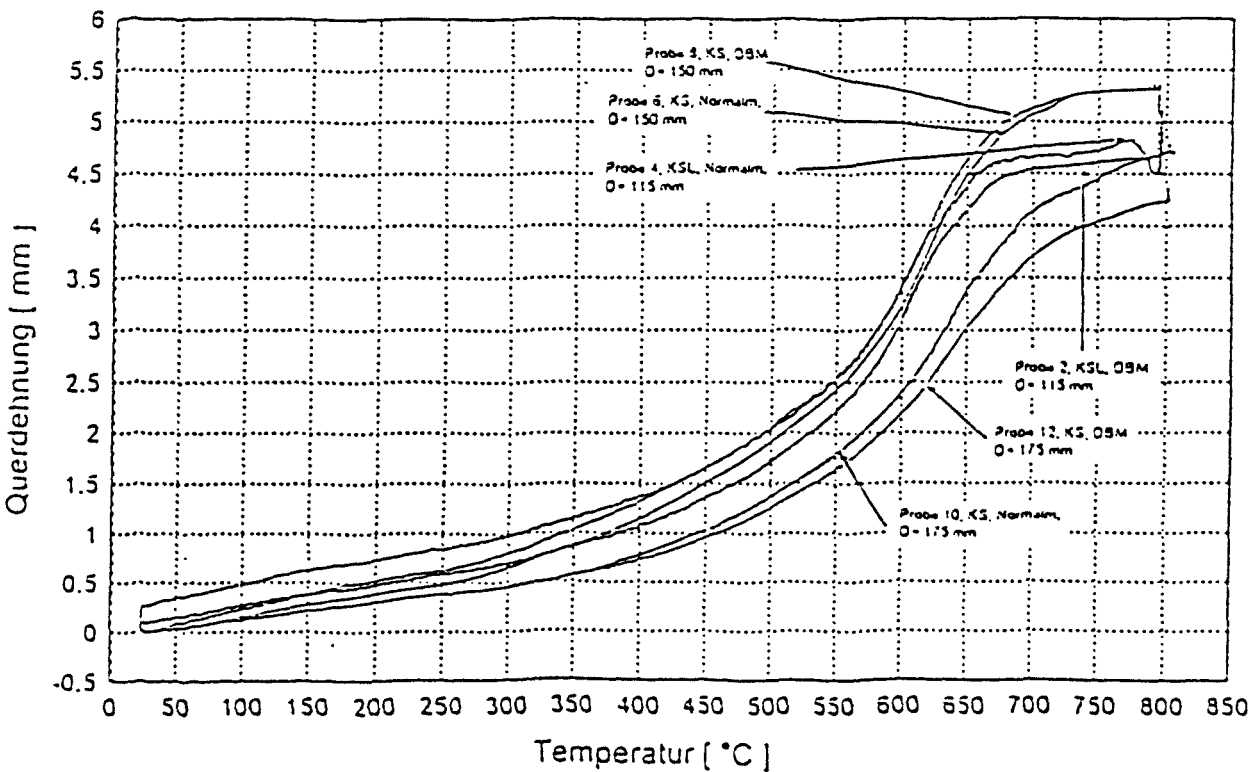


Bild 5.11: Warmkriechversuche - Stoßfugendehnung  
Vergleich KS - KSL/Dünnbettmörtel - Normalmörtel

### 5.3.3 Mauerwerksabschnitte aus Leichtbeton

Aus Rückstellproben von Bauteilprüfungen untersuchter Bimsbetonsteine wurden Probekörper mit 236 mm Wanddicke (Nenndicke) mit Normalmörtel in Stoß- und Lagerfugen als Kombination Stein/Mörtel erstellt.

In der Tabelle der Anlage 4.3 sind die durchgeführten Untersuchungen zusammengefaßt.

Die Untersuchungsarten und die Durchführung der Untersuchungen wurden in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Die Einzelergebnisse der gemessenen Verformungen in senkrechter und horizontaler Richtung sowie im Bereich der Fugen bei thermischer Dehnung  $\epsilon_{th}$  und bei den Warmkriechversuchen  $\epsilon_w$  für die Mauerwerksabschnitte aus Bimsbeton-Lochsteinen Hbl 2-0,8 mit Normalmörtel sind in [15] jeweils nach den Probekörpern geordnet grafisch dargestellt. Außerdem sind die Temperaturverteilung in der Prüfmaschine sowie die Temperaturen im Probekörper grafisch dargestellt.

In den Bildern 5.12 - 5.13 werden jeweils für die thermische Dehnung und den Warmkriechversuch die einzelnen Verformungsmessungen für Bimsbetonsteine Hbl 2-0,8 zusammengefaßt und gegenübergestellt.

Zusammenfassend kann für alle Verformungen gesagt werden, daß bis zu einer Temperaturerhöhung von 300 °C die Dehnungen leicht zunehmen, von 350 °C bis 600 °C wird die Neigung der Dehnungskurven steiler und danach bis etwa 700 °C wird das Maximum der Dehnung, z. T. verdoppeln sich die Dehnungen nochmals, erreicht.

Alle Verformungsmessungen bestätigten, daß bei Mauerwerk mit Normalmörtel größere Verformungen als bei Mauerwerk mit Dünnbettmörtel auftreten.



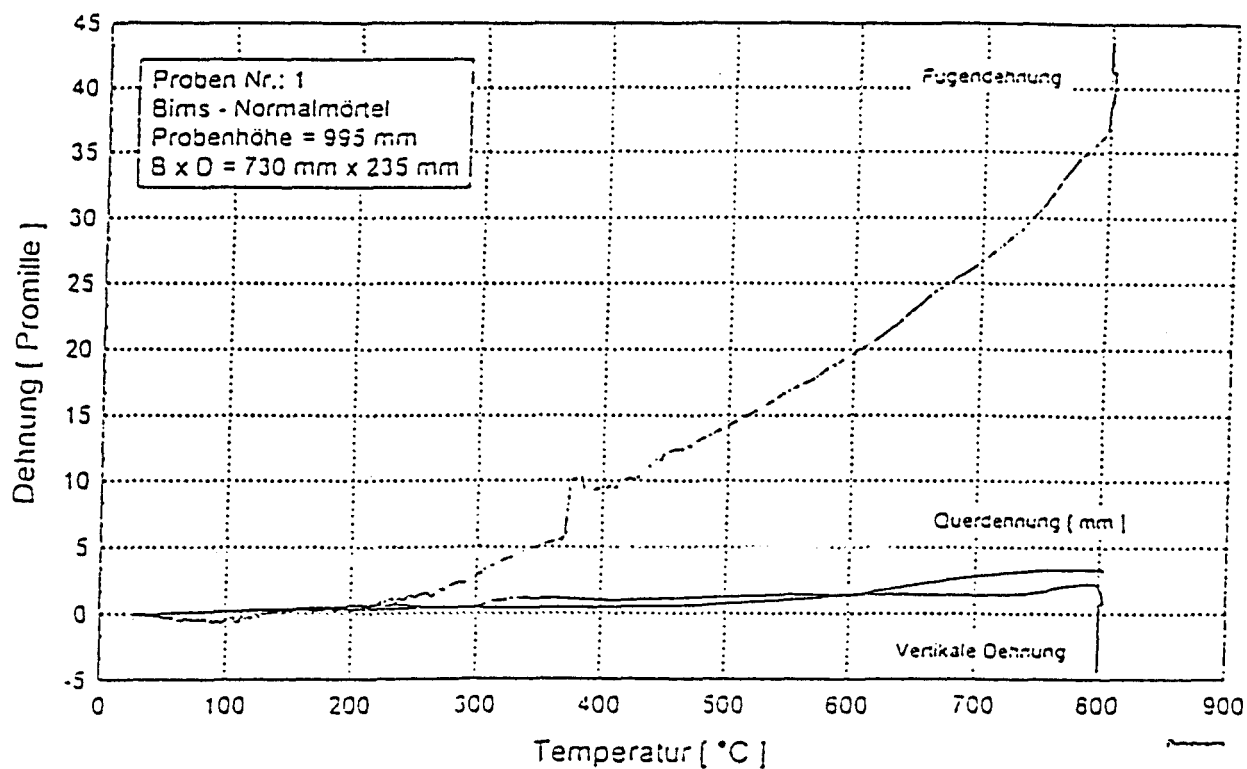


Bild 5.12: Thermische Dehnung - Verformungen  
Bimsbeton/Normalmörtel

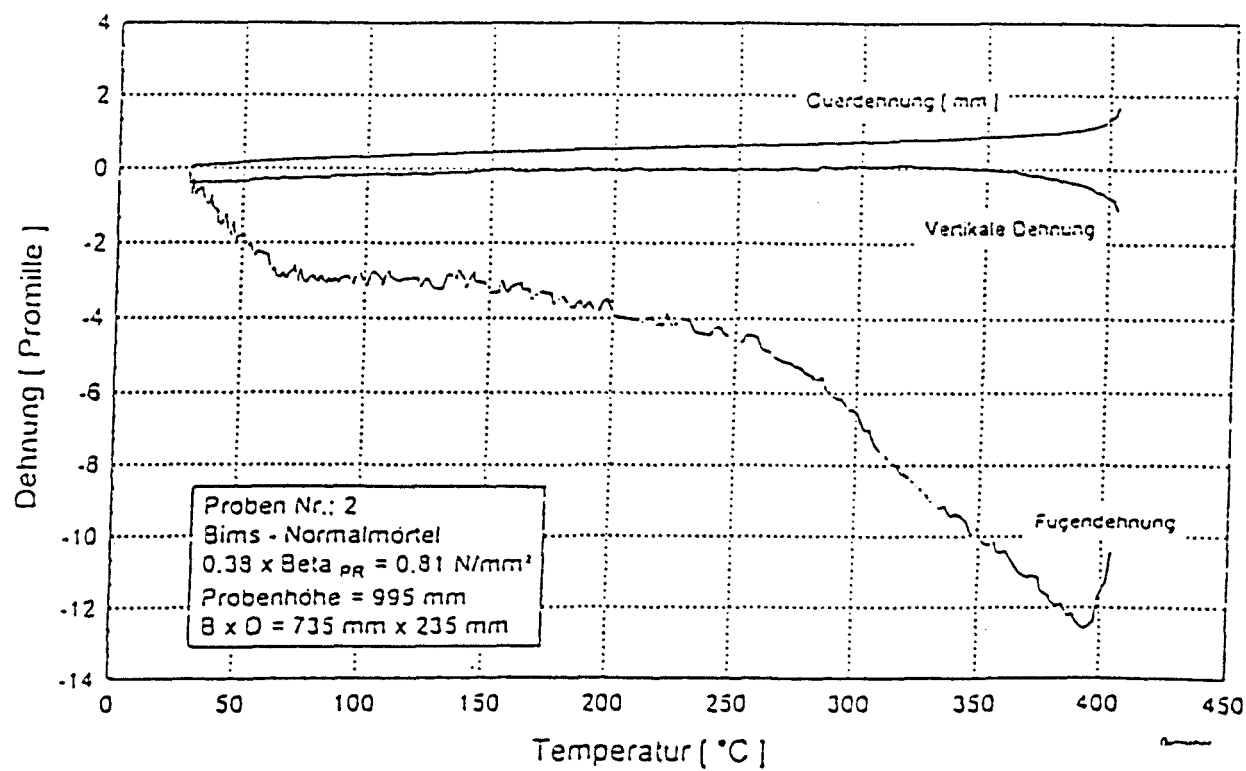


Bild 5.13: Warmkriechversuch - Verformungen  
Bimsbeton - Normalmörtel

Vergleicht man die Dehnungen der Bimsbetonsteine mit den Mauerwerksabschnitten, so liegen die Ergebnisse für die Einzelsteine innerhalb des Streubereiches der Mauerwerksabschnitte.

#### 5.3.4 Mauerwerksabschnitte aus Ziegeln

Hierzu wurden Probekörper mit 115 mm und 240 mm Wanddicke aus Hochlochziegel jeweils mit Leichtmörtel LM 36 oder mit Normalmörtel in Stoß- und Lagerfugen auch als Kombination Stein/Mörtel erstellt. Die Probekörper sind in der Anlage 4.2 dargestellt.

Die Lochziegel wurden zusammen mit den Lochziegel-Prismen aus dem selben Material und in einem Brand erstellt. Hiermit sollten Einflüsse aus unterschiedlichen Materialien und unterschiedlichen Bränden ausgeschlossen werden. Auf Vollziegel-Mauerwerk wurde verzichtet, weil Vollziegel in Deutschland als tragende Wände nicht mehr üblich sind.

In der Tabelle der Anlage 4.3 sind die durchgeführten Untersuchungen zusammengefaßt.

Die Untersuchungsarten und die Durchführung der Untersuchungen wurden in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Die Einzelergebnisse der gemessenen Verformungen in senkrechter und horizontaler Richtung sowie im Bereich der Fugen bei thermischer Dehnung  $\epsilon_{th}$  und bei den Warmkriechversuchen  $\epsilon_w$  für die Mauerwerksabschnitte aus Hochlochziegeln mit Leichtmörtel LM 36 bzw. Normalmörtel sind in [16] jeweils nach den Probekörpern geordnet grafisch dargestellt. Außerdem sind die Temperaturverteilung in der Prüfmaschine sowie die Temperaturen im Probekörper grafisch dargestellt.

In den Bildern 5.14 und 5.15 werden jeweils für die thermische Dehnung  $\epsilon_{th}$  und die Warmkriechversuche  $\epsilon_w$  die einzelnen

Verformungsmessungen der vertikalen Verformungen, in den Bildern 5.16 und 5.17 werden die horizontalen Verformungen und in den Bildern 5.18 und 5.19 die Fugendehnungen für Hochlochziegel zusammengefaßt und gegenübergestellt.

Zusammenfassend kann für alle Verformungen gesagt werden, daß bis zu einer Temperaturerhöhung von 300 °C die Dehnungen leicht zunehmen, von 350 °C bis 600 °C wird die Neigung der Dehnungskurven steiler und danach bis etwa 700 °C wird das Maximum der Dehnung erreicht.

Alle Verformungsmessungen zeigen, daß bei Mauerwerk mit Normalmörtel größere Verformungen als bei Mauerwerk mit Leichtmörtel auftreten.

Vergleicht man die Dehnungen der Ziegel mit den Mauerwerksabschnitten, so liegen die Ergebnisse für die Einzelsteine innerhalb des Streubereiches der Mauerwerksabschnitte.

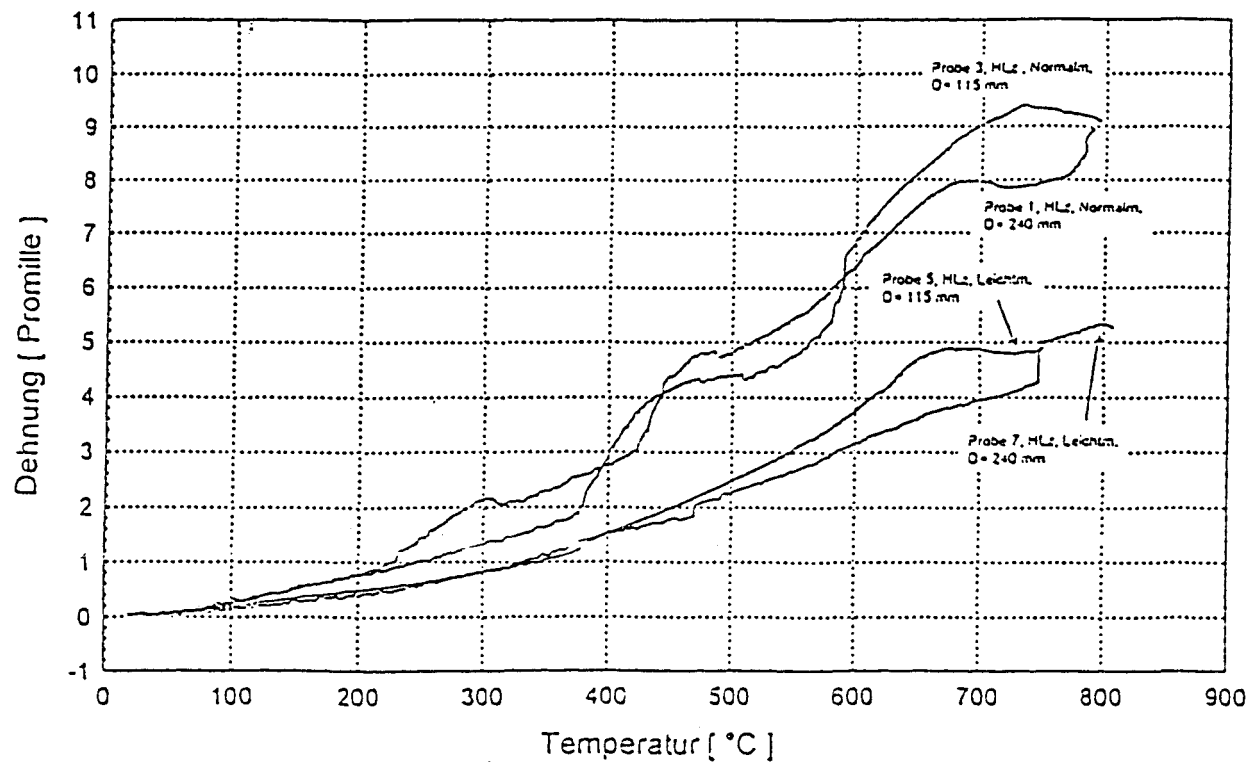


Bild 5.14: Thermische Dehnung - vertikale Verformung  
Vergleich HLz /Leichtmörtel - Normalmörtel

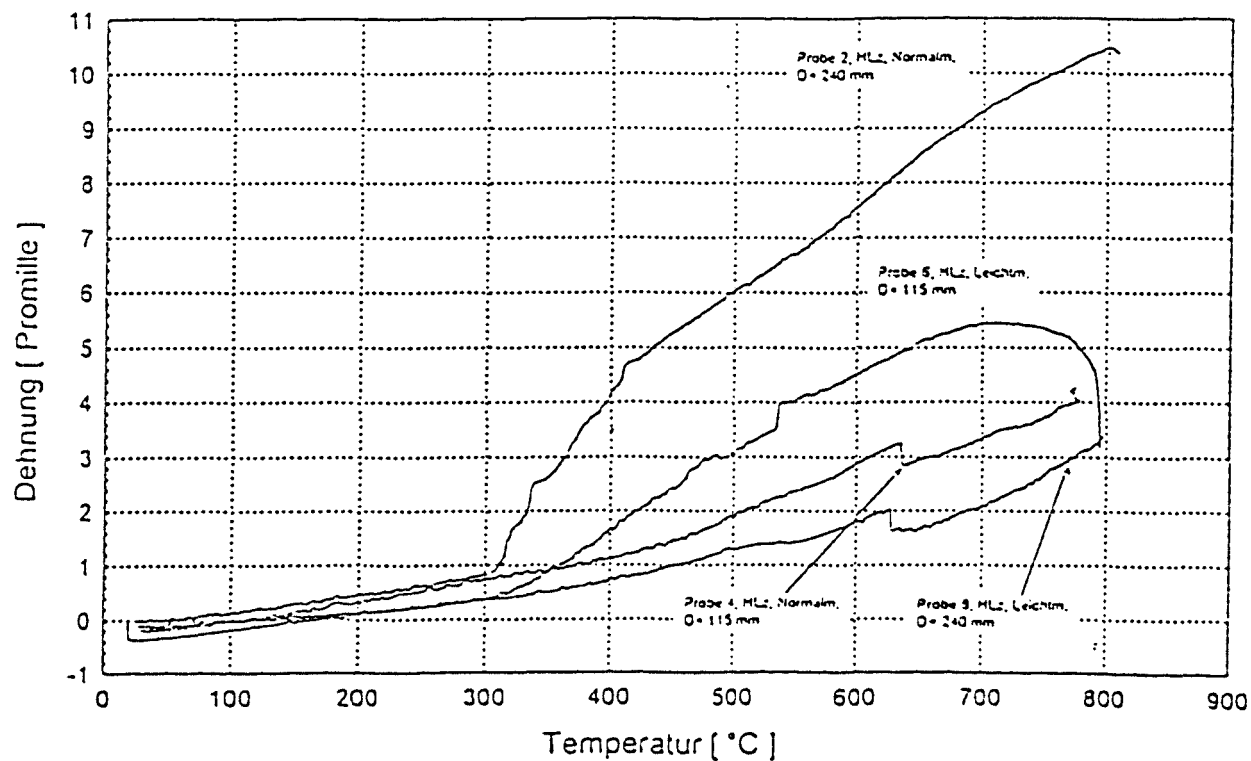


Bild 5.15: Warmkriechversuche - vertikale Verformung  
Vergleich HLz /Leichtmörtel - Normalmörtel

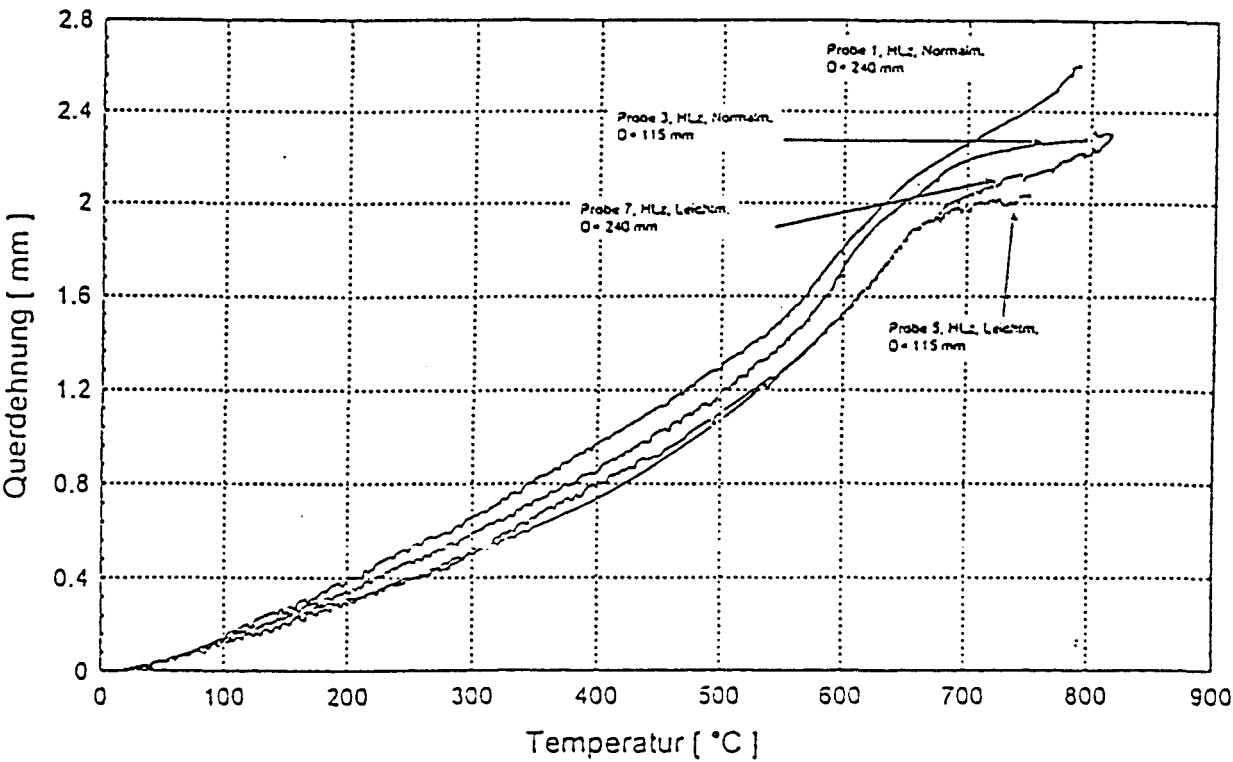


Bild 5.16: Thermische Dehnung - horizontale Dehnung  
Vergleich HLz /Leichtmörtel - Normalmörtel

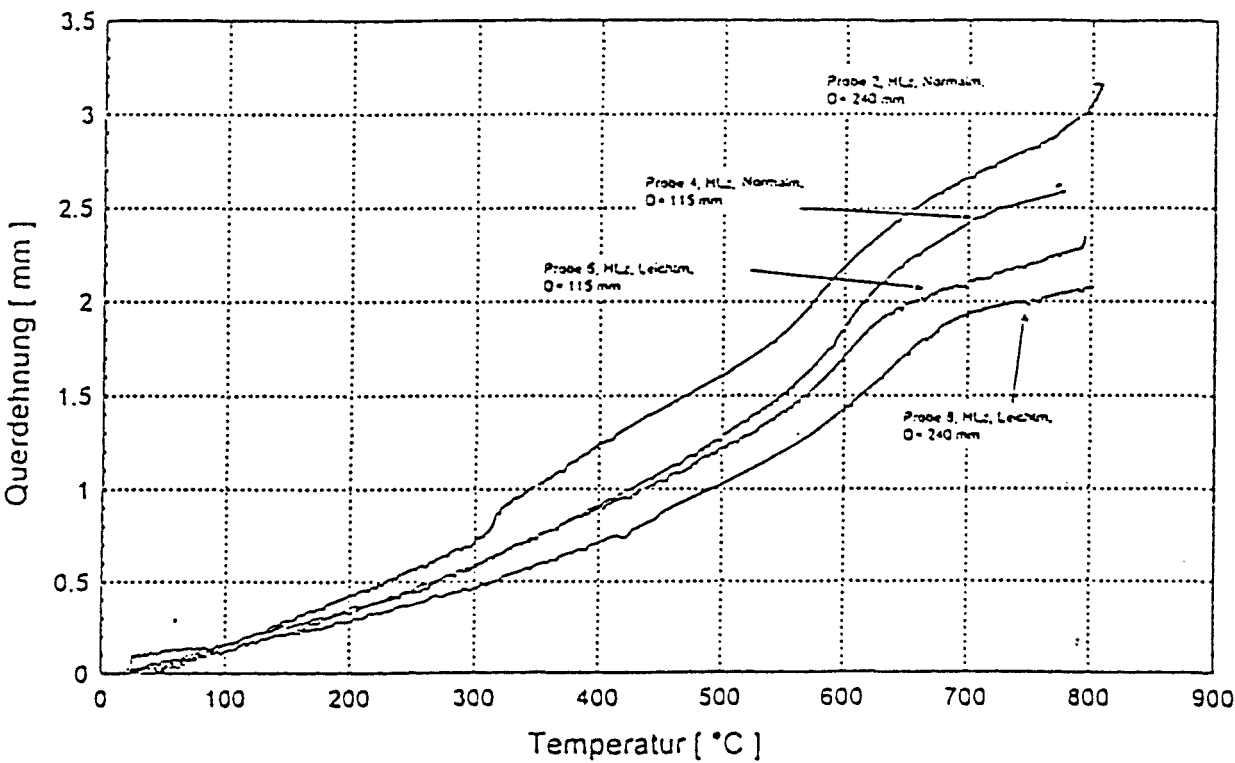


Bild 5.17: Warmkriechversuche - horizontale Dehnung  
Vergleich HLz /Leichtmörtel - Normalmörtel

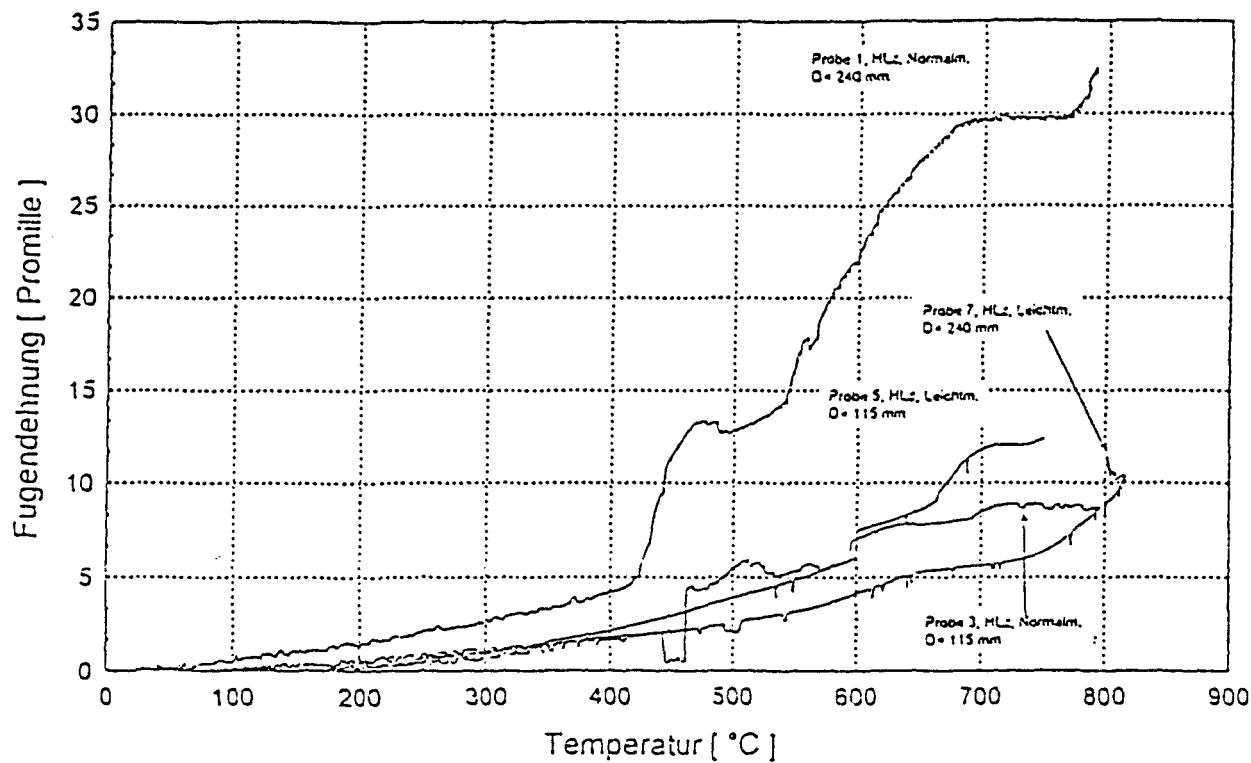


Bild 5.18: Thermische Dehnung - Stoßfugendehnung  
Vergleich HLz /Leichtmörtel - Normalmörtel

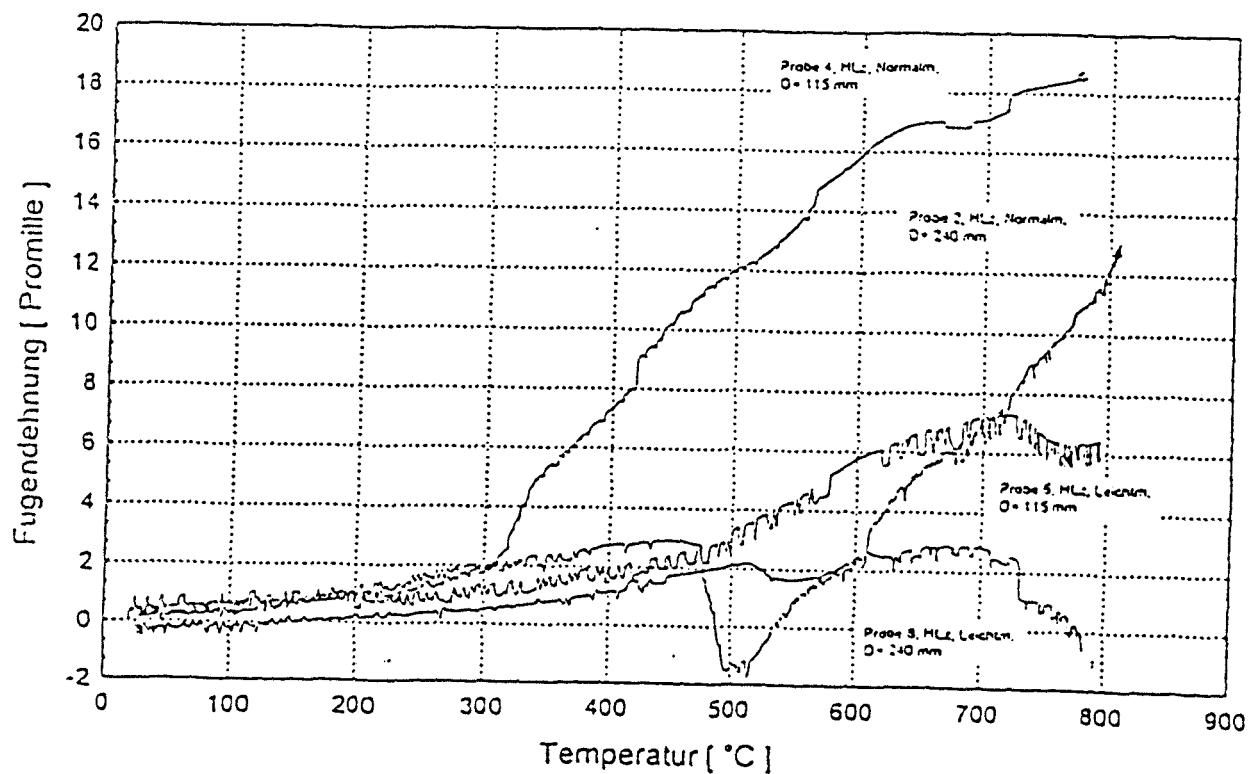


Bild 5.19: Warmkriechversuche - Stoßfugendehnung  
Vergleich HLz /Leichtmörtel - Normalmörtel

## 5.4 Vergleichende Betrachtungen, Schlußfolgerungen, Wertung

### 5.4.1 Vergleichende Betrachtungen

Hierzu ist anzumerken, daß die Verformungsmessungen an den Mauerwerksabschnitten unter erhöhter Temperatur aufgrund der langen Wege zum Dilatometersystem sehr empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen sind. Je Steinmaterial wurden stichprobenartig einzelne Steinsorten - jeweils in Anlehnung an die Baustoffuntersuchungen nach Abschnitt 4 - und einzelne Stein/Mörtel Kombinationen untersucht.

Aufgrund der Absprache mit der Industrie, wobei jeweils die hauptsächlichen Anwendungsbereiche zugrunde gelegt wurden, wurden teilweise unterschiedliche Wanddicken, bezogen auf die Steinarten, und unterschiedliche Stein/Mörtel Kombinationen untersucht. Es lassen sich daher nicht alle Untersuchungen miteinander über alle Sorten vergleichen. Es können einerseits Mauerwerksabschnitte, vermauert mit Normalmörtel MN IIa, aus Porenbeton, Kalksandsteinen, Leichtbetonsteinen und Ziegeln und andererseits Mauerwerksabschnitte, vermauert mit Dünnbettmörtel, aus Porenbetonsteinen und Kalksandsteinen sowie vermauert mit Leichtmörtel LM 36, aus Ziegeln miteinander verglichen werden.

In den Bildern 5.18 bis 5.23 sind die Untersuchungen für Normalmörtel zusammengefaßt. Die Einzel-Ergebnisse für Dünnbettmörtel sind den Bildern 5.1 bis 5.11 und für Leichtmörtel 5.14 bis 5.17 zu entnehmen.

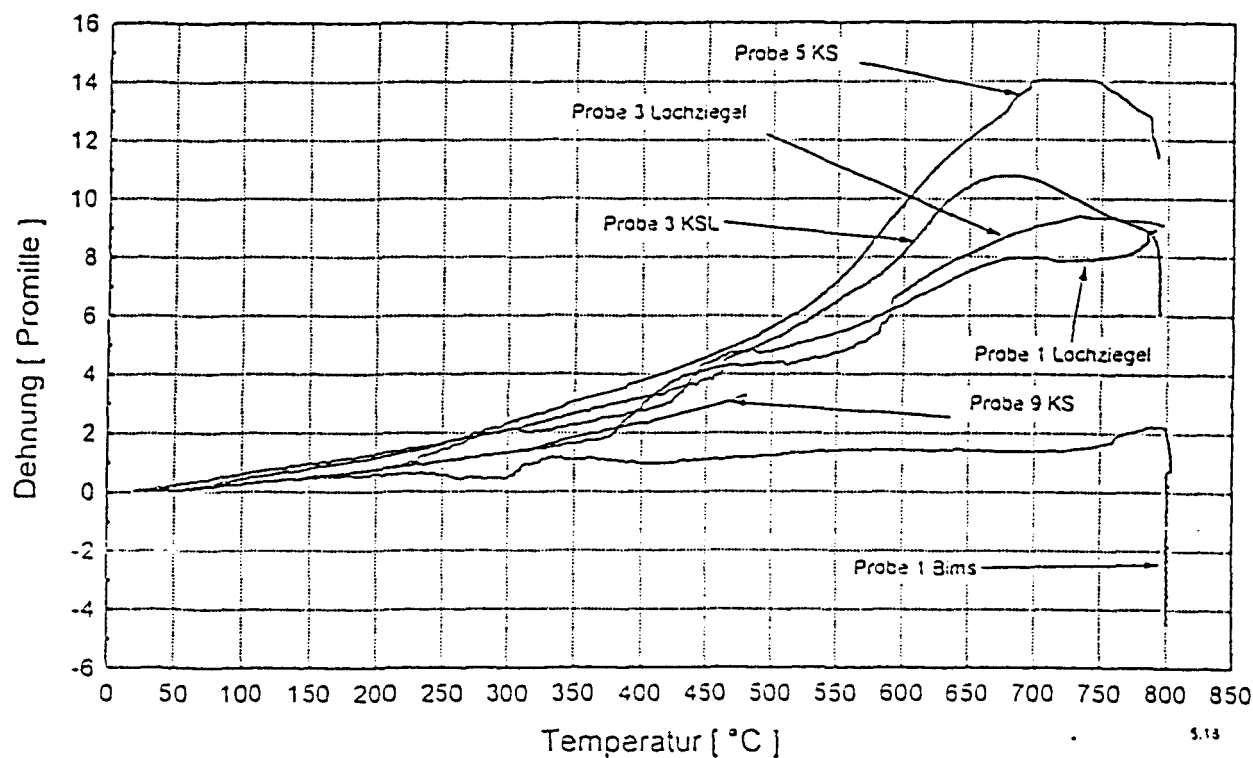


Bild 5.18: Thermische Dehnung - Vertikale Verformung  
Mauerwerksabschnitte mit Normalmörtel

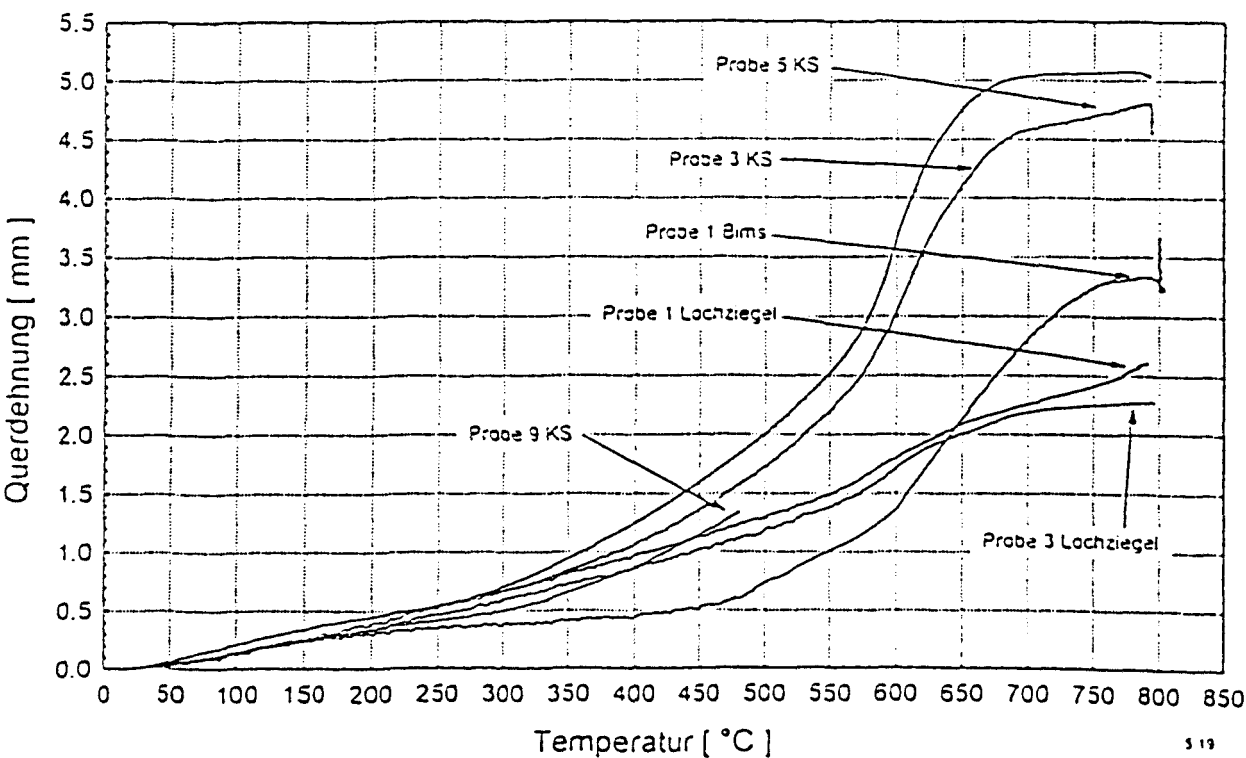


Bild 5.19: Thermische Dehnung - Horizontale Dehnung  
Mauerwerksabschnitte mit Normalmörtel



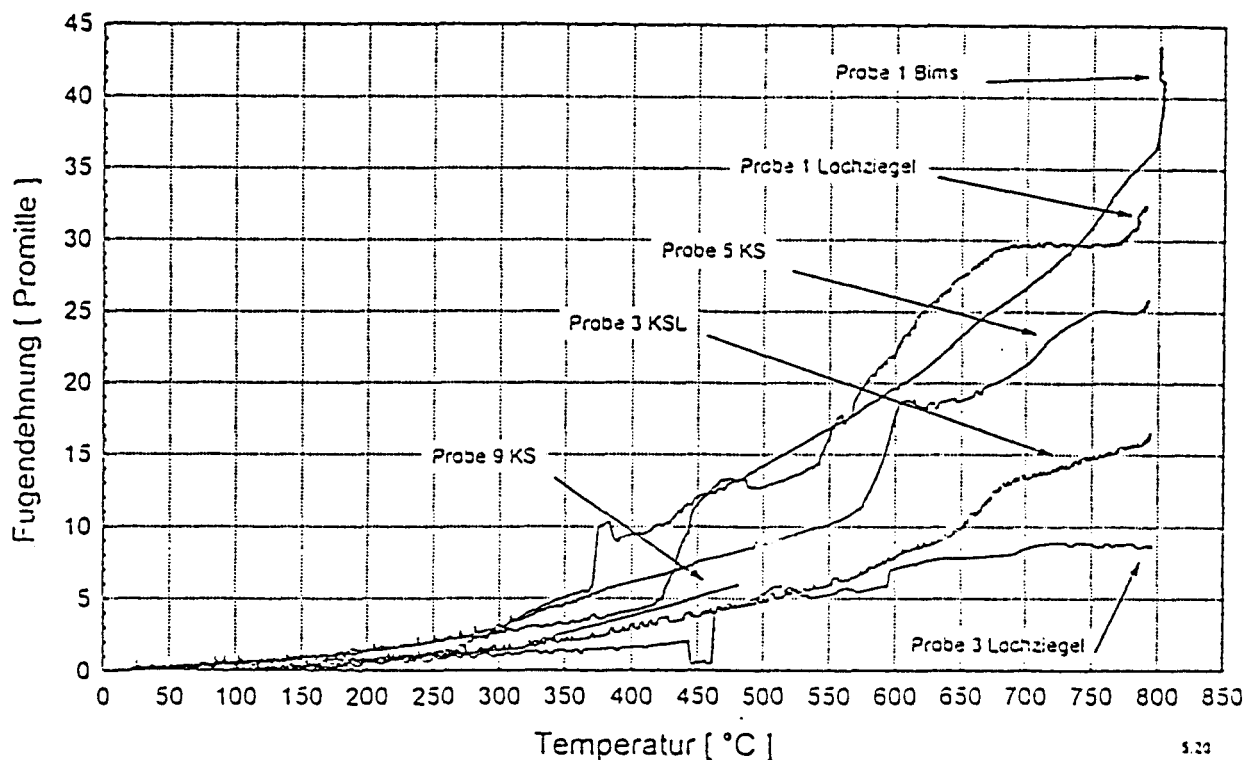


Bild 5.20: Thermische Dehnung - Fugendehnung  
 Mauerwerksabschnitte mit Normalmörtel

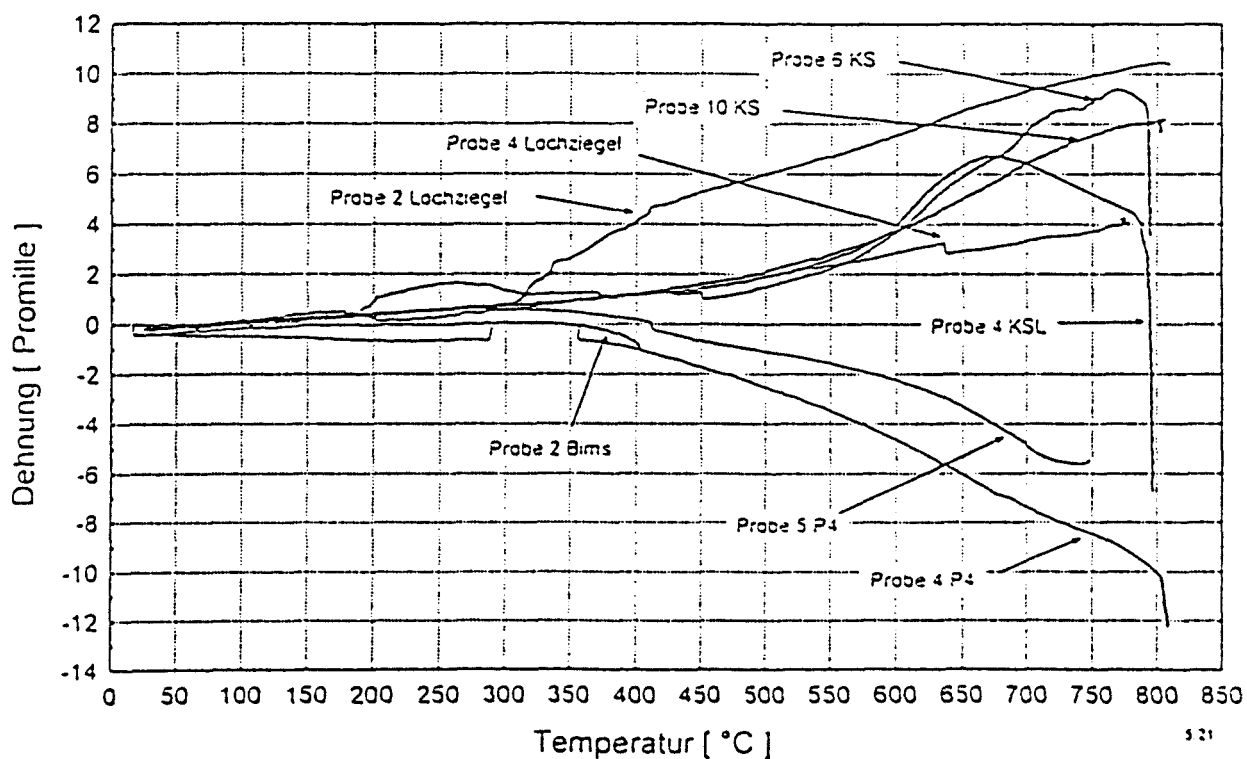


Bild 5.21: Warmkriechversuche - Vertikale Verformung  
 Mauerwerksabschnitte mit Normalmörtel

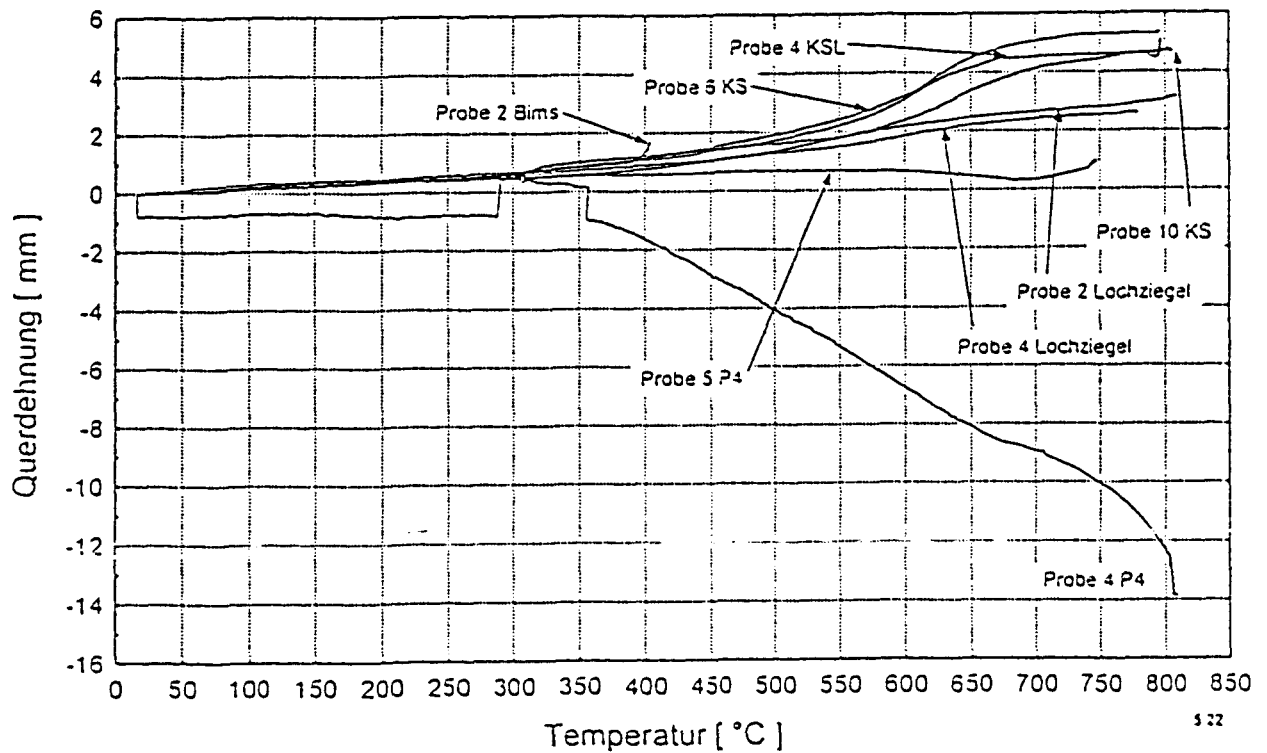


Bild 5.22: Warmkriechversuche - Horizontale Dehnung  
 Mauerwerksabschnitte mit Normalmörtel

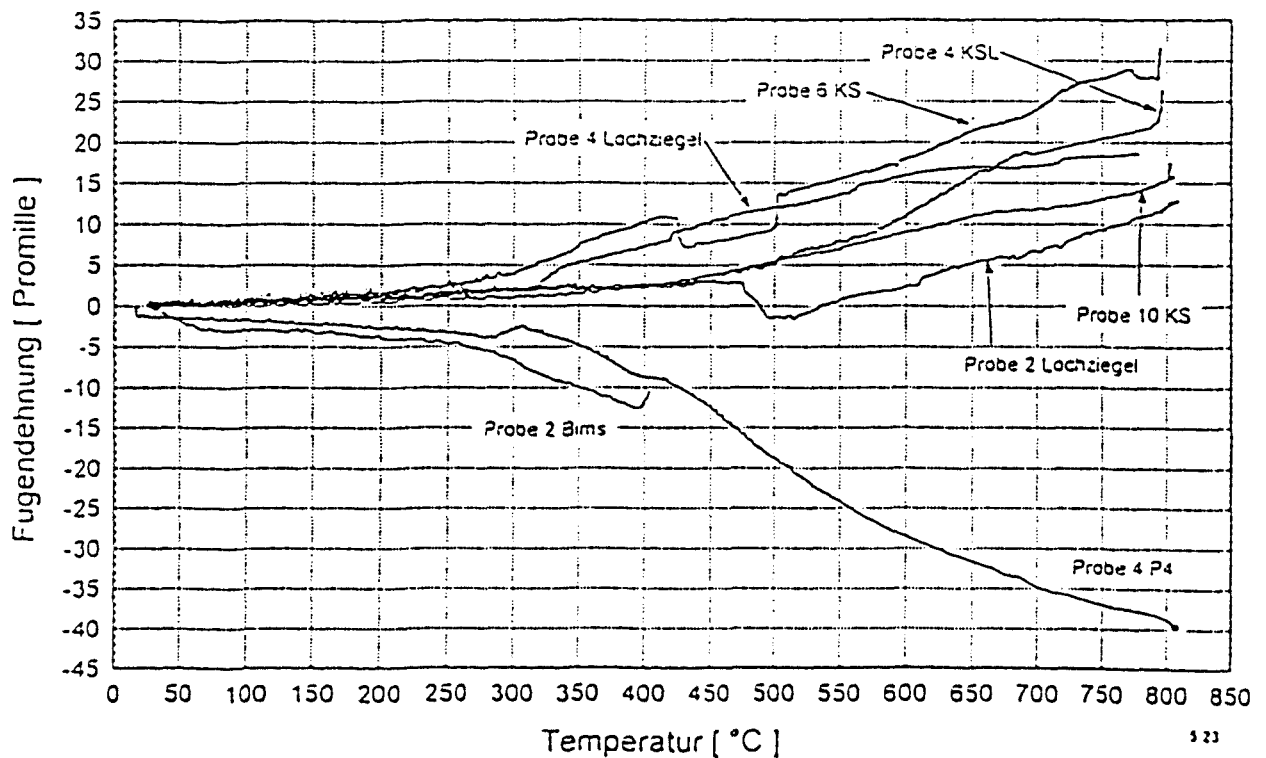


Bild 5.23: Warmkriechversuche - Fugendehnung  
 Mauerwerksabschnitte mit Normalmörtel

Die maximalen Werte der thermischen Dehnung und der Warmkriechversuche bei 700 °C sind in der Tabelle 5.1 gegenübergestellt.

Mauerwerk aus	Thermische Dehnung $\varepsilon_{th}$ [°/°°]			Warmkriechen $\varepsilon_w$ [°/°°]		
	vertikale Ver- formung	horizon- tale Ver- formung	Fugen- dehnung	vertikale Ver- formung	horizon- tale Ver- formung	Fugen- dehnung
Poren- beton NM	-1)	-1)	-1)	-5	4,1	-34
Kalksand- stein NM	13	5	22	8	5	28
Leicht- beton NM	3	4	27	-2)	-2)	-2)
Ziegel NM	9	2,5	30	9	2,7	17
Poren- beton DBM	-5	0,4	-	-12	0,8	-
Kalksand- stein DBM	14	4,5	16	6	5	16
Ziegel LM 36	4,9	2	12	5,5	2,1	7

1) nicht durchgeführt

2) Probekörper vorzeitig bei 400 °C versagt

Tabelle 5.1: Verformungen der Mauerwerksabschnitte bei 700 °C

#### 5.4.2 Schlußfolgerungen, Wertung

Die vorliegenden Ergebnisse eignen sich zum jetzigen Zeitpunkt zwar für Trendaussagen zu den untersuchten Materialarten, können jedoch noch nicht als abgesichert gelten. Zur Absicherung der vorliegenden Ergebnisse sind weitere Versuche erforderlich. Teilweise sind erhebliche Streubreiten erkennbar.

Die Ergebnisse für Kalksandstein-Mauerwerk entsprechen in etwa den Werten der Baustoff-Untersuchungen der Kalksandsteine selber. Ein Einfluß des Mörtels läßt sich nur im Bereich der Fugendehnungen erkennen. Außerdem kann festgestellt werden, daß die Gesamtdehnungen mit Mörtel etwa größer sind als nur beim Stein allein.

Beim Porenbeton-Mauerwerk ist, wie erwartet wurde, ein deutlicher Unterschied zwischen Mauerwerk mit Dünnbettmörtel oder mit Normalmörtel erkennbar. Die Ergebnisse mit Dünnbettmörtel entsprechen den Werten der Baustoff-Untersuchungen der Porenbetonsteine allein. Bei Einsatz von Normalmörtel werden die Gesamtstauchungen wesentlich verringert, da sich der Mörtel unter Hochtemperatur dehnt. Das Schrumpfen der Porenbetonsteine wird zum großen Teil überdehnt. Bei der Verwendung von Dünnbettmörtel findet nahezu keine Querverformung statt.

Beim Leichtbeton-Mauerwerk kann nur etwas zur thermischen Dehnung ausgesagt werden, weil der Probekörper des Warmkriechversuches vorzeitig bei etwa 400 °C versagt hat. Weitere Probekörper standen nicht zur Verfügung. Es ist kein wesentlicher Unterschied bei der thermischen Dehnung zwischen Mauerwerk aus Bimssteinen, vermauert mit Normalmörtel, und den Werten der Baustoffuntersuchungen der Bimssteine allein erkennbar.

Beim Ziegelmauerwerk sind deutliche Unterschiede zwischen Mauerwerk vermauert mit Normalmörtel oder Leichtmörtel LM 36 erkennbar. Die Werte des Ziegelmauerwerkes, vermauert mit Leichtmörtel LM 36, entsprechen etwa den Werten der Baustoffuntersuchungen der Hochlochziegel allein. Die Dehnungen des Ziegelmauerwerkes, vermauert mit Normalmörtel, verdoppeln sich nahezu gegenüber den Werten der Baustoffuntersuchungen der Hochlochziegel allein.

Unberücksichtigt muß bei diesen Schlußfolgerungen und der Wertung der Einfluß der unterschiedlichen Steinabmessungen bleiben, weil es nicht möglich war, für alle Steinsorten die

gleichen Abmessungen zu erhalten. Bei Porenbeton, Leichtbeton und Kalksandstein wurden Steinhöhen 240 mm bzw. 235 mm verwendet und bei den Ziegeln 110 mm Steinhöhe, d.h. der Fugenanteil war bei den Ziegeln doppelt so hoch. Ebenso können bisher, aufgrund der vorliegenden Ergebnisse, keine Schlußfolgerungen zu vermörtelten bzw. unvermörtelten Stoßfugen hinsichtlich des Einflusses auf die Fugendehnungen gezogen werden, weil die Anzahl der vorliegenden Ergebnisse zu gering ist.



## 6 ENTWICKLUNG EINES ALLGEMEINEN RECHNERISCHEN NACHWEIS- VERFAHRENS ZUM TRAG- UND VERFORMUNGSVERHALTENS VON MAUERWERK UNTER BRANDBEANSPRUCHUNG

### 6.1 Thermische Analyse

#### 6.1.1 Grundlagen

Zur thermischen Analyse von Mauerwerk und damit zur Ermittlung der instationären Temperaturfelder innerhalb der Querschnitte wurde das Programmsystem "FIRES-T" [19] eingesetzt. Dieses Programm wird im iBMB bereits seit Jahren zur Ermittlung von Temperaturfeldern in beliebigen Bauteilquerschnitten anderer Baustoffe - Stahlbeton, Stahl, Verbund, etc. - bei vorgegebenen Temperatur/Zeit-Verläufen der Bauteilumgebung verwendet.

Die Temperaturen des Bauteilquerschnittes werden in einem vorgegebenen Elementraster mit dem Verfahren der Finite Elemente in Verbindung mit einem Integrationsverfahren für definierte Zeitschritte ermittelt. Das Elementraster wird der vorgegebenen Querschnittsgeometrie angepaßt. Der nichtstetige Verlauf der die Erwärmung beeinflussenden Materialkennwerte - Wärmeleitzahl  $\lambda$ , spezifische Wärmekapazität  $c_p$  und spezifische Dichte  $\rho$  und die Zusammensetzung der Bauteilquerschnitte aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften erfordern die Diskretisierung der Querschnitte i. d. R. in eine sehr große Anzahl von Elementen (Elementgrößen etwa 2 - 3 cm Seitenlänge). Vorhandene Symmetrien wurden, wie in Bild 6.1 dargestellt, zur Reduzierung des Rechenaufwandes genutzt.

Die Wärmeleitung für den zweidimensionalen Fall wird mit der Gleichung von Fourier beschrieben:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \cdot \left( \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) \quad (5)$$

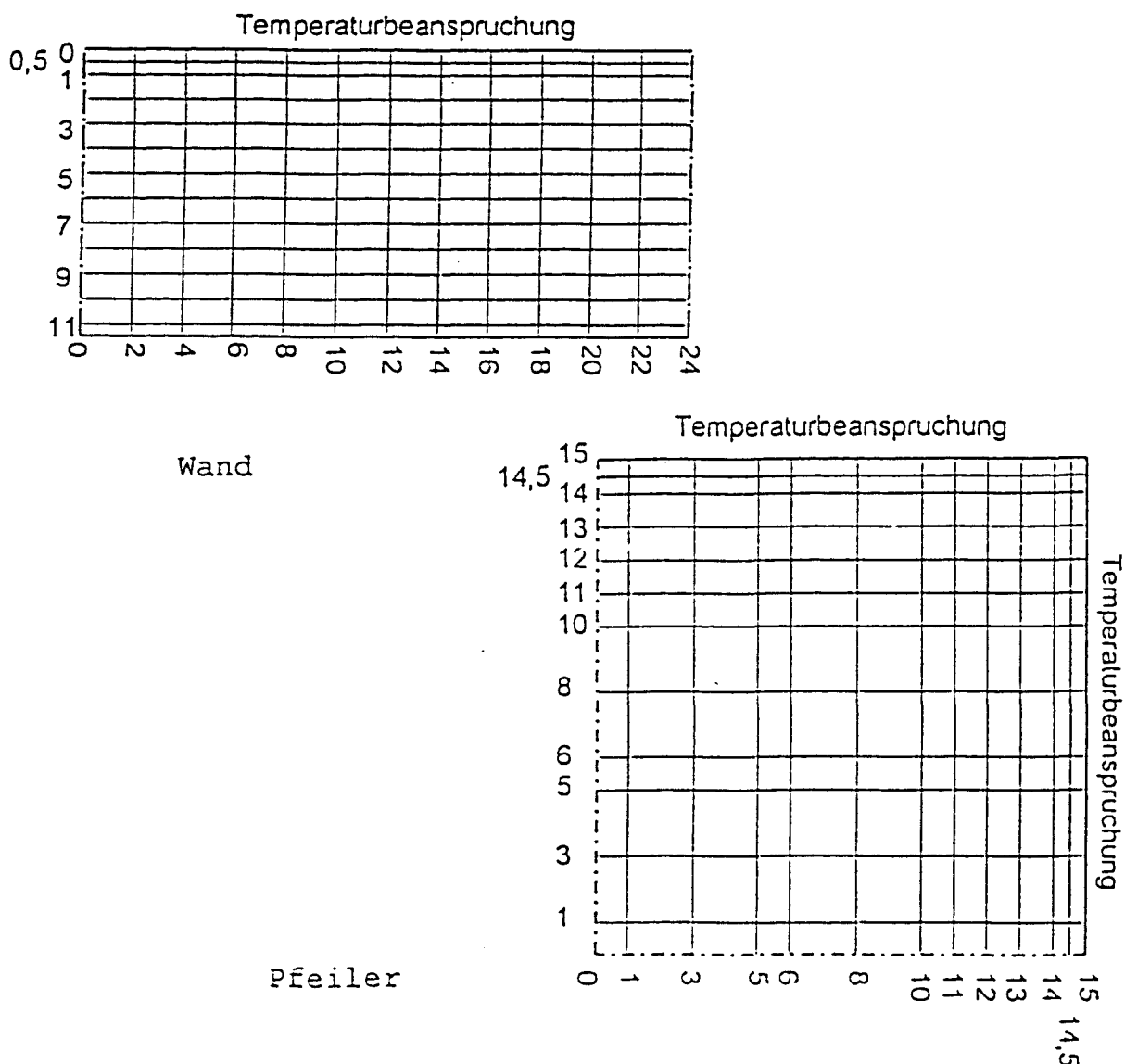


Bild 6.1: Aufteilung eines Wand- und Pfeilerquerschnittes in Elemente zur Ermittlung des instationären Temperaturfeldes

Die Gleichung ist exakt nur für homogene und isotrope Stoffe gültig. Bei Anwendung des Verfahrens auf Mauerwerk mit Querschnitten aus Steinen und Mörtel sind einige Vereinfachungen erforderlich:

- Wasser verdampft, sobald die Siedetemperatur erreicht wird. Im vorliegenden Fall handelt es sich im wesentlichen um die Restfeuchte, die aufgrund der per Definition



zugrunde zu legenden Ausgleichsfeuchte immer vorhanden ist.

- Der Energieverbrauch für das Verdampfen von Wasser und sonstigen energieverzehrenden Vorgängen wird vereinfacht durch eine geeignete Wahl des Rechenwertes für die spezifische Wärmekapazität der Mauerwerksart im Temperaturbereich 100 °C - 200 °C berücksichtigt, vgl. Bilder 6.2 bis 6.5.
- Mauerwerk wird bei diesen Untersuchungen zu erst einmal als homogener Baustoff angesehen, s.a. Abschnitt 6.1.3. Das heterogene Gebilde - Stein/Mörtel - und Lochanteile werden nur pauschal erfaßt.

Da sich die Rechenwerte der Wärmeleitzahl  $\lambda(T)$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c_p(T)$  und der spezifischen Dichte  $\rho(T)$  für die Mauerwerksarten bedeutend in Abhängigkeit von der Temperatur verändern und weil unstetige Verläufe definiert werden, vgl. Bilder 6.2 bis 6.5, müssen die Zeitschritte  $\Delta t$  zur Ermittlung der Temperatur mit etwa 2,5 - 5 Minuten genügend klein gewählt werden.

Die Wärmeübergangsbedingungen an der Grenzschicht Bauteilumgebung/Bauteiloberfläche sind u.a. abhängig

- vom Baustoff an der freien Oberfläche,
- von der Art der Beflammung,
- von der Brandraumgeometrie,
- von der Beschaffenheit der Brandraumauskleidung und
- von den Ventilationsbedingungen im Brandraum.

Die Rückrechnungen umfangreicher Temperaturmessungen in den Brandräumen des iBMB haben ergeben, daß bei Versuchen gute Übereinstimmungen zwischen gemessenen und berechneten Bauteiltemperaturen erzielt werden können, wenn die in Tabelle 6.1 genannten Werte für die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  und das Emissionsverhältnis  $\epsilon$  angesetzt werden.

Baustoff	Wärmeübergangszahl $\alpha$	Emissionsverhältnis $\epsilon$
	[W/m <sup>2</sup> K]	
Porenbeton	0,0025	0,4
Kalksandstein	0,0025	0,4
Leichtbeton	0,0025	0,4
Ziegel	0,0025	0,4

Tabelle 6.1: Rechenwerte für Wärmeübergangszahl  $\alpha$  und Emissionszahl  $\epsilon$

### 6.1.2 Problemstellung

Für Mauerwerk lagen bisher keine der o.a. Werte unter Hochtemperaturbeanspruchung vor, lediglich für Normaltemperatur. In der Literatur konnten auch nur Einzelwerte für Sondersteine, die zur Ofenausmauerung von Hochöfen verwendet werden, gefunden werden. Diese Steine und damit auch die Werte sind jedoch für eine Verwendung unter erhöhter Dauertemperatur bestimmt, so daß sie nur als Anhaltswerte dienen konnten.

In Abschnitt 2.2.6 wurde bereits zusammengefaßt, wie vielfältig und unterschiedlich die einzelnen Mauerwerkswerte für die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und die Dichte unter Normaltemperatur sind. Diese Unterschiede führen unter Hochtemperatur dazu, daß wesentlich größere Bandbreiten als bei anderen Baustoffen, z. B. Beton und Stahl auftreten. Es muß einerseits je nach Steinart unterschieden werden und andererseits muß auch den Bandbreiten innerhalb einer Steinsorte Rechnung getragen werden. Hierbei ist außerdem zu berücksichtigen, daß sich die Ausgangswerte jeweils auf Mauerwerk, z.B. Porenbeton- oder Leichtbetonmauerwerk mit jeweils unterschiedlichen Rohdichten, beziehen. Die Mörtelsorte muß hierbei bisher fast völlig vernachlässigt werden, z.B. hat Ziegelmauerwerk einer bestimmten Sorte mit Normalmörtel eine andere Wärmeleitfähigkeit als mit Leichtmörtel. Diese Unter-

schiede, die im Normaltemperaturbereich, insbesondere bei Außenwänden aufgrund der Wärmeschutzverordnung, eine große Rolle spielen, mußten bisher bei der thermischen Analyse vernachlässigt werden.

Grundlage der durchgeführten thermischen Analyse war die Auswertung von zahlreichen Bauteilprüfungen nach DIN 4102 Teil 2 und Teil 3, die als Industrieaufträgen von der MPA BS durchgeführt wurden, vgl. Tabellen der Anlage 1. Im Rahmen dieser Bauteilprüfungen werden nach Norm nur die Oberflächentemperaturen bei raumabschließenden Bauteilen und die Tragfähigkeit bei tragenden Bauteilen bestimmt. Es konnte jedoch seit etwa 1980 mit den meisten Auftraggebern vereinbart werden, daß zusätzlich Temperaturmessungen innerhalb der Wandquerschnitte bei einseitiger Brandbeanspruchung und innerhalb von Pfeilern bei vierseitiger Brandbeanspruchung durchgeführt wurden. Die Temperaturen wurden jeweils in etwa halber Bauteilhöhe ermittelt. Hierzu wurden sogenannte Thermoleitern beim Aufmauern der Wände in eine Mörtelfuge eingelegt. Bei der Verwendung von Dünnbettmörtel wurde der jeweiligen Stein leicht eingekerbt, so daß ausreichend Platz für die Meßstellen war. Die Kerbe wurde nach Einlegen der Meßstellen dann mit Dünnbettmörtel gefüllt, damit die Meßstellen ausreichend Kontakt zum Baustoff hatten und nicht eine Lufttemperatur ermittelten. Da i. d. R. tragende Wände geprüft wurden, war es nicht möglich, Löcher in die Steine zu bohren und dort die Meßstellen einzubauen. Es mußte befürchtet werden, daß dadurch ggfs. Steine so beschädigt werden, daß ein vorzeitiges Versagen der Tragfähigkeit der Wand eintreten könnte. In den Anlagen 2.1 und 2.2 sind die Lage der Meßstellen und die Verteilung über die Querschnitte dargestellt.

Bei der Auswertung der Bauteilprüfungen zeigten sich folgende Probleme:

- Bei vielen Prüfungen sollte der Nachweis als Brandwand erbracht werden, so daß die Prüfungen nach 90 min Brandbeanspruchung beendet wurden, obwohl die Temperaturen

aufgrund der dicken Wände noch relativ gering waren. Dieses gilt insbesondere für Leichtbeton- und Kalksandstein-Mauerwerk.

- Beim Ziegelmauerwerk wurden sehr viele Bauteile verputzt, um das Abplatzen zu verhindern. Die Putze führen dazu, daß die Aufheizgeschwindigkeit innerhalb der Wand geringer ist und die Erwärmung verzögert wird. Das Erwärmungsverhalten wird maßgeblich beeinflusst. Bei den wenigen ungeputzten Wänden platzten einige Wände vorzeitig ab, so daß dadurch auch wiederum das Erwärmungsverhalten beeinflusst wurde. Es stehen daher nur sehr wenig Prüfergebnisse zur Verfügung, die das ungestörte Erwärmungsverhalten von Ziegelmauerwerk wiedergeben.
- Beim Porenbeton-Mauerwerk, vermauert mit Dünnbettmörtel, lassen sich am einfachsten Temperatur-Meßstellen einbauen, die die gesichersten Werte ergeben. Aus diesem Grund wurde die thermische Analyse mit Porenbeton-Mauerwerk gestartet. Andererseits weist Porenbeton, verglichen mit den bisher untersuchten Baustoffen wie Beton, eine sehr hohe Wärmedämmung auf.

#### 6.1.3 Umsetzung der Materialgesetze in das Rechenverfahren

Für die vier Steinarten

- Porenbeton,
- Kalksandstein,
- Leichtbeton (im wesentlichen Bims als Zuschlag),
- Ziegel

wurden alle aus den vorliegenden Bauteilprüfungen verwendbaren Temperaturergebnisse aus den Diagrammen der Prüfzeugnisse abgegriffen und als Meßwerte in den Computer eingegeben. Die

verwendeten Prüfergebnisse sind in den Tabellen der Anlage 1 gekennzeichnet. Anschließend wurden Mittelwerte von Einzeltemperaturmeßstellen vergleichbarer Bauteile gebildet, um die Streubreite der Meßergebnisse abzudecken. Diese Mittelwerte wurden dann als Basis für die thermische Analyse und Nachrechnung verwendet.

Als Ausgangswerte für die rechnerische Analyse wurden außerdem die tatsächlich ermittelten Rohdichten der jeweiligen Stein zugrunde gelegt. In der Tabelle 6.2 sind die verwendeten Werte für die einzelnen Steinarten zusammengefaßt.

Baustoff	Rohdichte [kg/m³]	Wärmeleitfähig- keit [W/cm/K]	Spez. Wärmekapazi- tät [W•min/g/K]
Porenbeton	400	0,001	0,0167
Kalksandstein	1800	0,0099	0,0167
Leichtbeton	682	0,0021	0,0195
Ziegel	900	0,0042	0,0094

Tabelle 6.2: Ausgangswerte der Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität für die thermische Analyse

Ausgehend von den Werten der Tabelle 6.2 wurden sehr umfangreiche Nachrechnungen für die einzelnen Steinarten durchgeführt. Hierbei wurde der Energieverbrauch durch das Verdampfen der Ausgleichsfeuchte - des physikalisch gebundenen Porenwassers - in den in den Bildern 6.2, 6.5, 6.8 sowie 6.11 dargestellten, temperaturabhängigen Rechenwerten der spezifischen Wärmekapazität berücksichtigt. Da dies kein reversibler Vorgang ist, gelten die in den o.a. Bildern angegebenen Definitionen nur für mit der Zeit zunehmenden Temperaturverläufen.

Die ermittelten Materialkennwerte (Rechenwerte) gehen als Grundlage in das Rechenverfahren zur mechanischen Analyse von

Mauerwerk ein, d. h. auf der Basis dieser Werte werden für die jeweilige Mauerwerksart Temperaturen im Querschnitt in Abhängigkeit von der Zeit vorgegeben. Im vorliegenden Fall wird als Brandbeanspruchung jeweils die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) nach DIN 4102 Teil 2 vorausgesetzt.

#### 6.1.3.1 Thermische Analyse - Porenbeton

In Bild 6.2 sind die ermittelten Rechenwerte für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , spezifische Wärmekapazität  $c_p$  und die Rohdichte  $\rho$  in Abhängigkeit von der Temperatur für Porenbeton - Mauerwerk dargestellt.

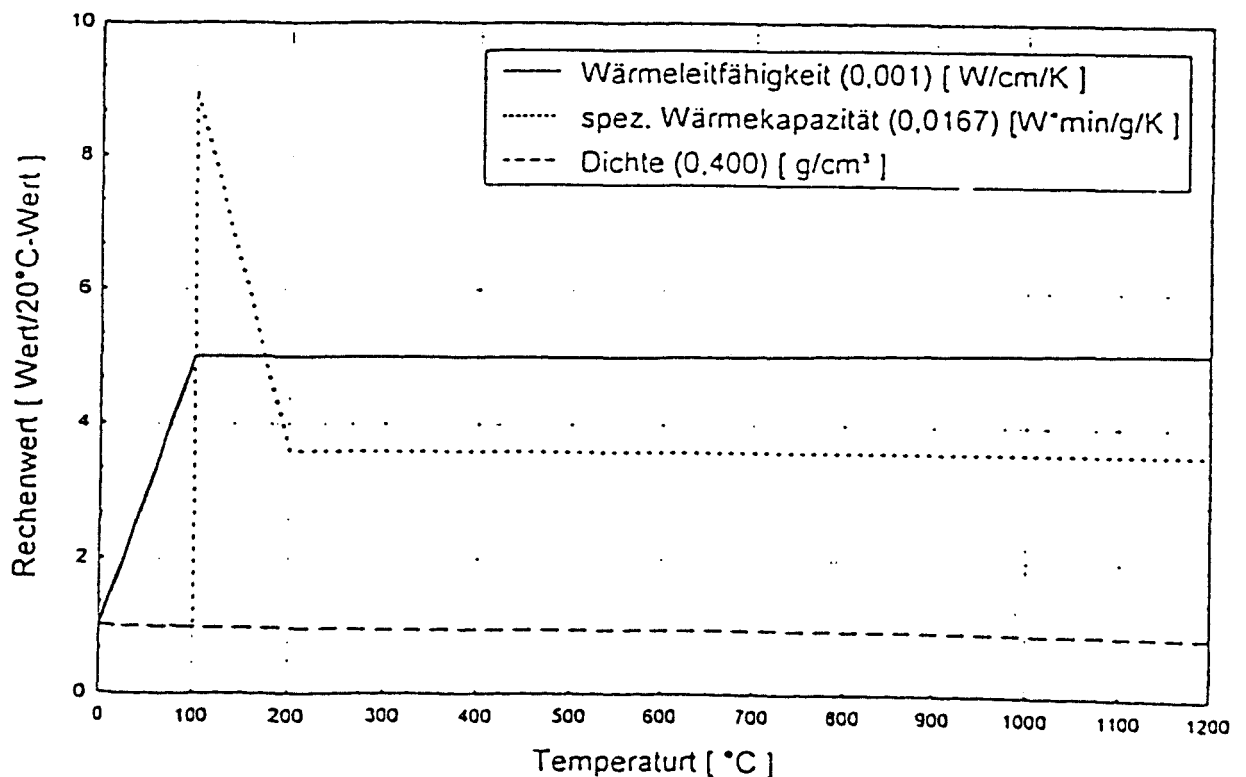


Bild 6.2: Rechenwerte der temperaturabhängigen Materialwerte von Porenbeton

Deutlich erkennbar ist der Peak bei 100 °C zur Berücksichtigung des physikalisch gebundenen Porenwasser.

Mit diesen Werten wurden thermische Analysen für die verschiedensten Porenbeton-Bauteile - Wände und Pfeiler mit unterschiedlichen Abmessungen - durchgeführt. Exemplarisch sind einige Ergebnisse der Nachrechnungen in den Anlagen 5.1 zusammengefaßt. Es werden Vergleiche zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen sowohl für Wände als auch für Pfeiler graphisch dargestellt, die eine sehr gute Übereinstimmung zeigen. Außerdem wurden auf der Basis der errechneten Temperaturen Isothermenbilder für verschiedene Querschnitte, ebenfalls Wände und Pfeiler, zu verschiedenen Zeitpunkten erstellt. Je ein Beispiel hierzu wird in den Bildern 6.3 und 6.4 gezeigt.

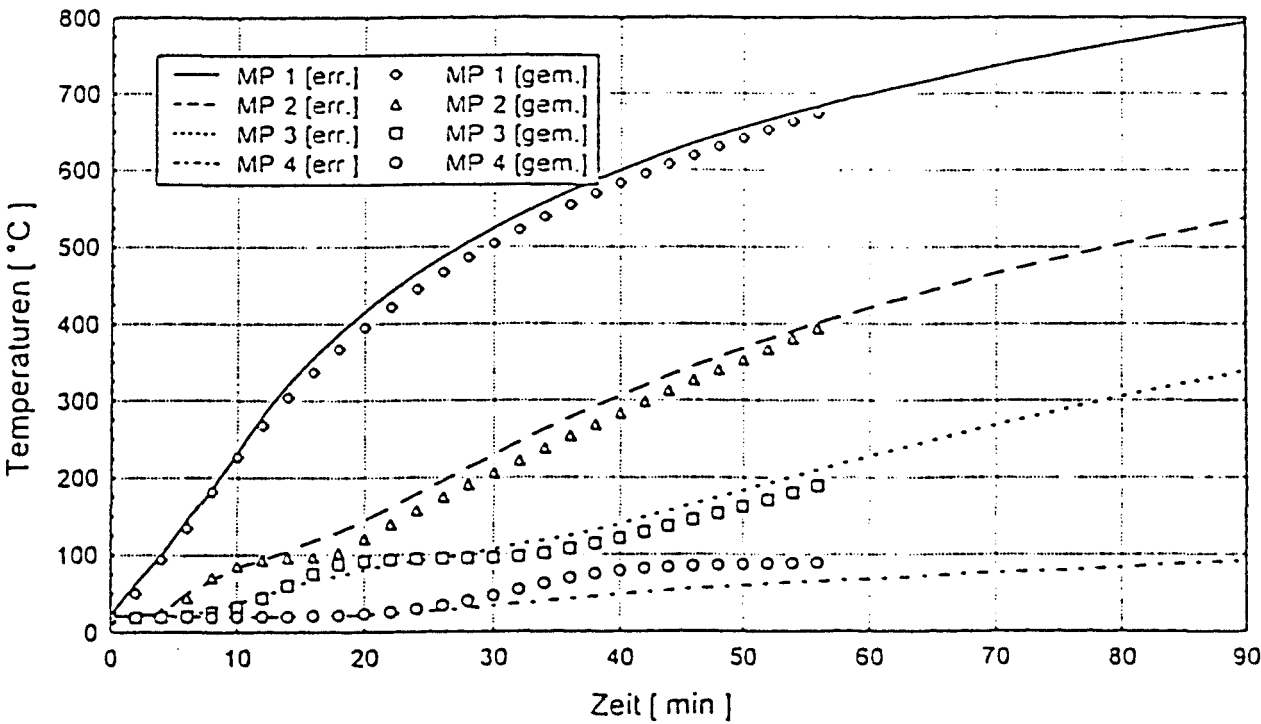


Bild 6.3: Vergleich errechneter und gemessener Temperaturen  
in einer 115 mm dicken Porenbeton - Wand

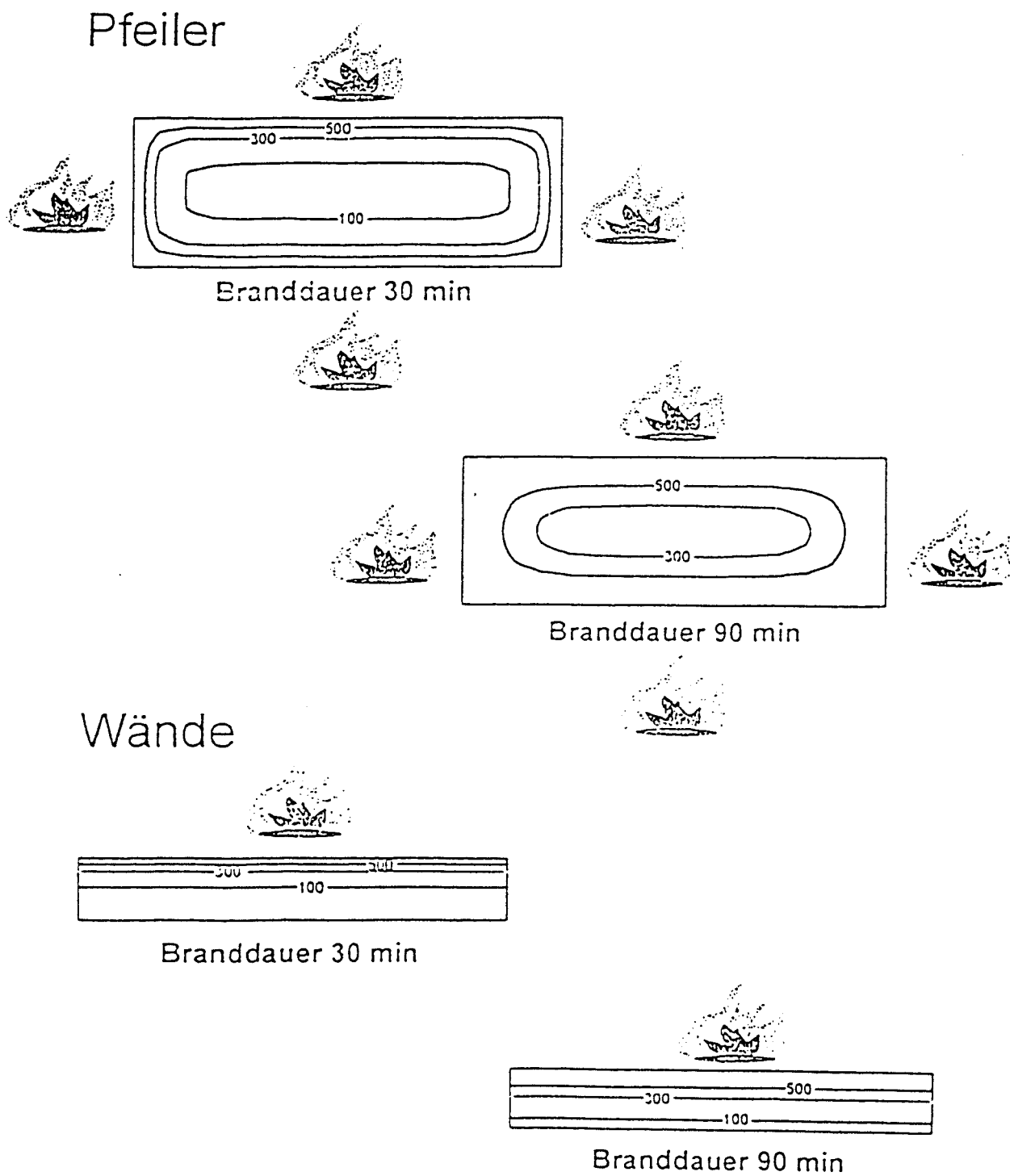


Bild 6.4: Isothermenbilder für Porenbeton-Pfeiler und -Wände zu verschiedenen Zeitpunkten



### 6.1.3.2 Thermische Analyse - Kalksandstein

In Bild 6.5 sind die ermittelten Rechenwerte für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , spezifische Wärmekapazität  $c_p$  und die Rohdichte  $\rho$  in Abhängigkeit von der Temperatur für Kalksandstein-Mauerwerk dargestellt.

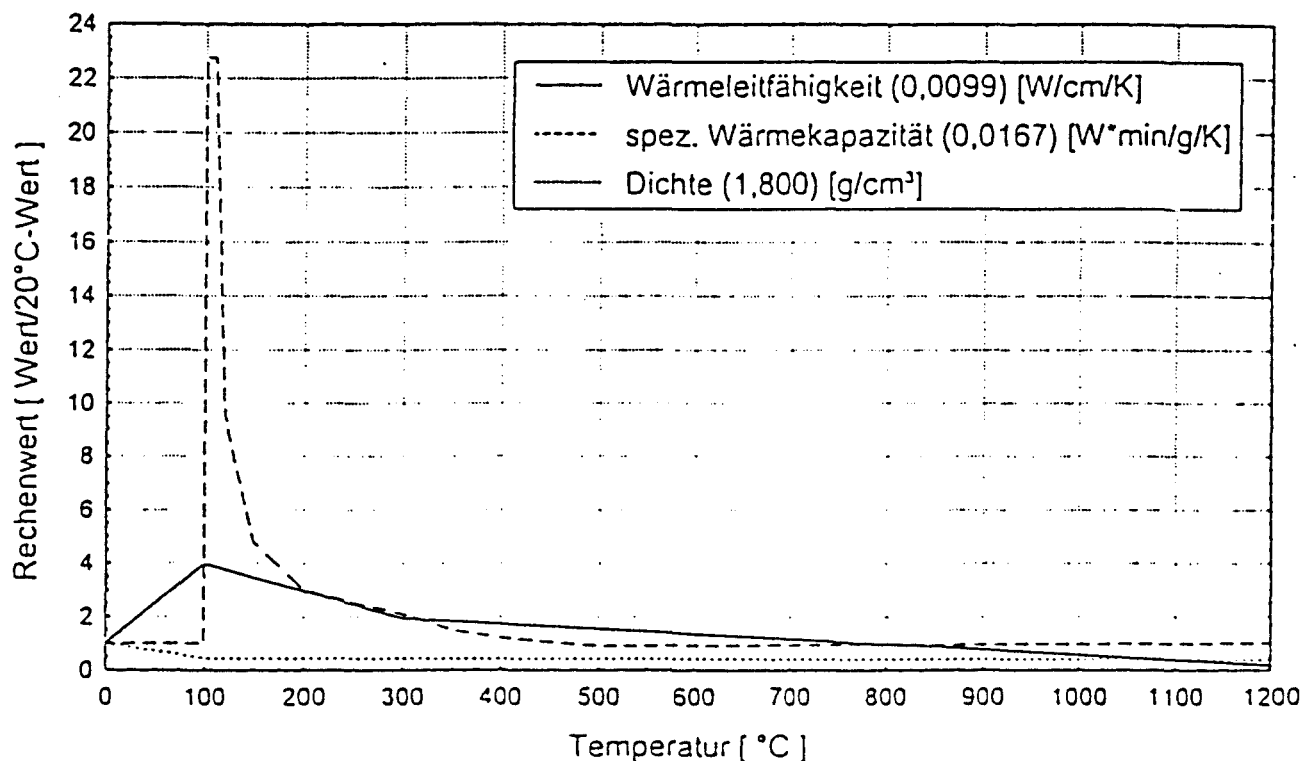


Bild 6.5: Rechenwerte der temperaturabhängigen Materialwerte von Kalksandstein

Deutlich erkennbar ist der Peak bei 100 °C zur Berücksichtigung des physikalisch gebundenen Porenwasser. Da Kalksandstein jedoch im Brandfall nicht nur physikalisch sondern auch chemisch gebundenes Wasser freisetzt, wurde zur Berücksichtigung diese Eigenart der Peak bei 100 °C mit einem kleinen Plateau ausgebildet.

Mit diesen Werten wurden thermische Analysen für die verschiedensten Kalksandstein-Bauteile - Wände und Pfeiler mit unterschiedlichen Abmessungen - durchgeführt. Exemplarisch

sind einige Ergebnisse der Nachrechnungen in den Anlagen 5.2 zusammengefaßt. Es werden Vergleiche zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen sowohl für Wände als auch für Pfeiler graphisch dargestellt, die eine sehr gute Übereinstimmung zeigen. Außerdem wurden auf der Basis der errechneten Temperaturen Isothermenbilder für verschiedene Querschnitte, ebenfalls Wände und Pfeiler, zu verschiedenen Zeitpunkten erstellt. Je ein Beispiel hierzu wird in den Bildern 6.6 und 6.7 gezeigt.

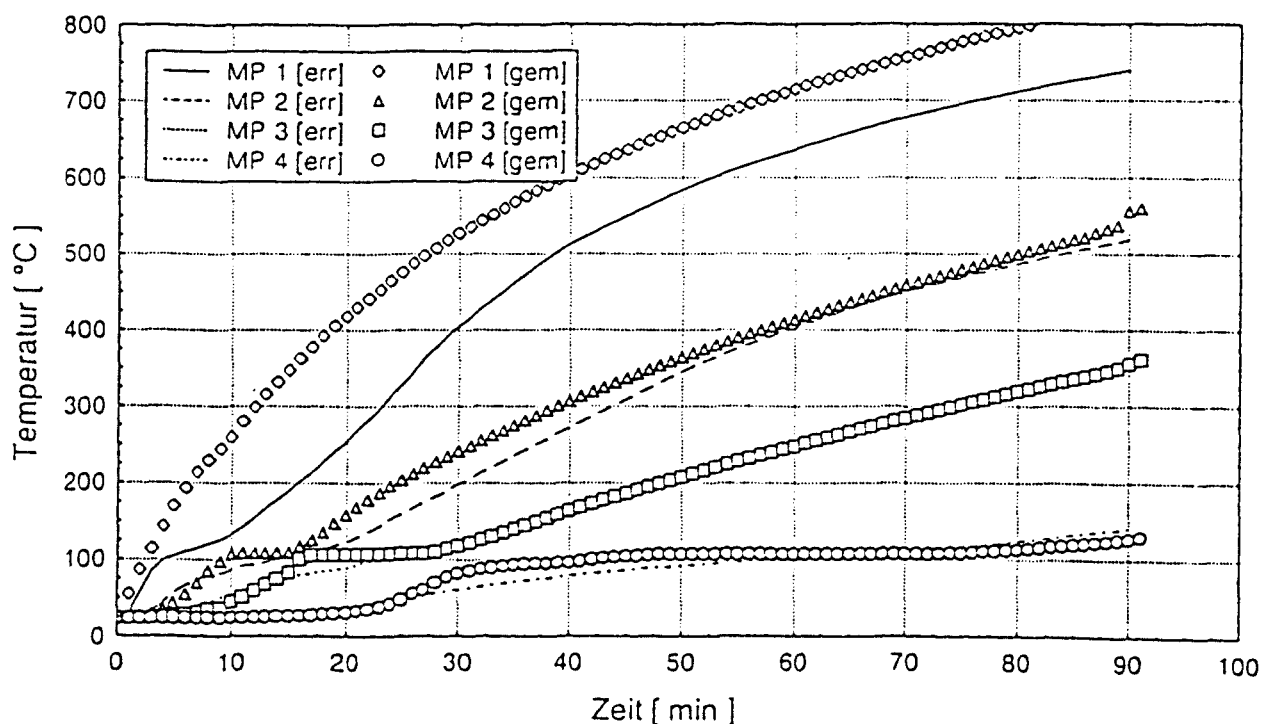


Bild 6.6: Vergleich errechneter und gemessener Temperaturen in einer 150 mm dicken Kalksandstein - Wand

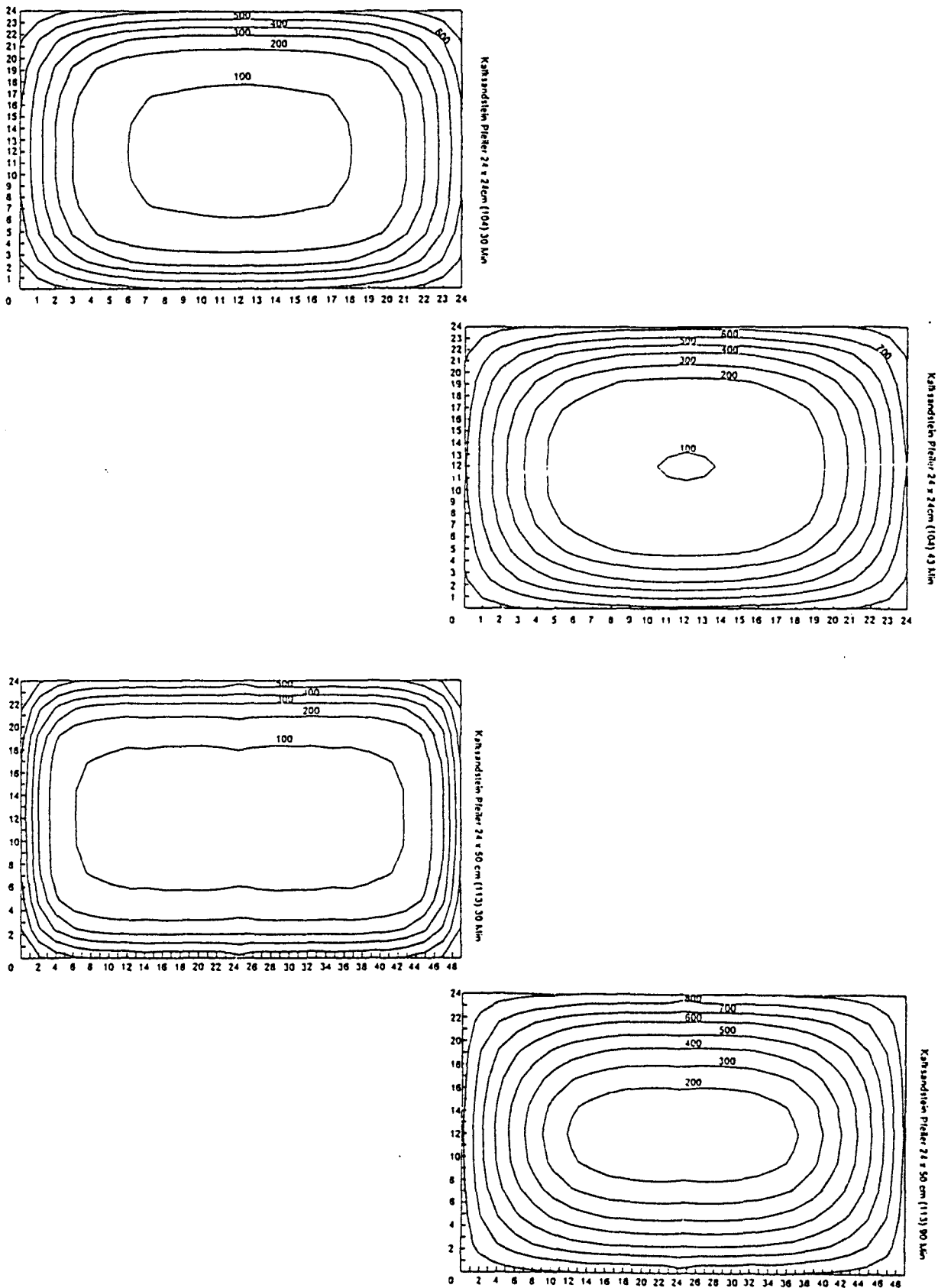


Bild 6.7: Isothermenbilder für unterschiedliche Kalksandstein-Pfeiler zu verschiedenen Zeitpunkten

#### 6.1.3.3 Thermische Analyse - Leichtbeton (Bims)

In Bild 6.8 sind die ermittelten Rechenwerte für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , spezifische Wärmekapazität  $c_p$  und die Rohdichte  $\rho$  in Abhängigkeit von der Temperatur für Leichtbeton-Mauerwerk dargestellt.

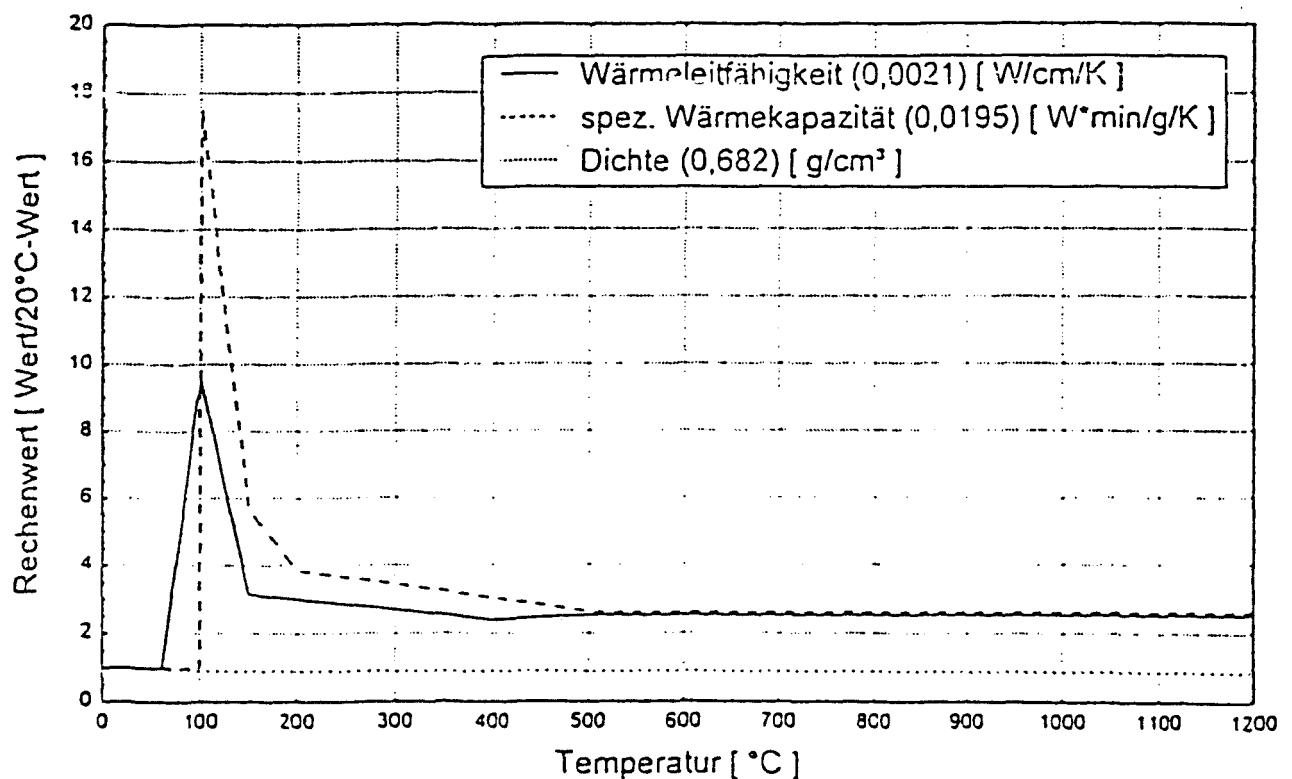


Bild 6.8: Rechenwerte der temperaturabhängigen Materialwerte von Leichtbeton (Bims)

Deutlich erkennbar ist wiederum der Peak bei 100 °C zur Berücksichtigung des physikalisch gebundenen Porenwasser.

Mit diesen Werten wurden thermische Analysen für die verschiedensten Leichtbeton-Bauteile - Wände und Pfeiler mit un-

terschiedlichen Abmessungen - durchgeführt. Exemplarisch sind einige Ergebnisse der Nachrechnungen in den Anlagen 5.3 zusammengefaßt. Es werden Vergleiche zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen sowohl für Wände als auch für Pfeiler graphisch dargestellt, die eine sehr gute Übereinstimmung zeigen. Außerdem wurden auf der Basis der errechneten Temperaturen Isothermenbilder für verschiedene Querschnitte, ebenfalls Wände und Pfeiler, zu verschiedenen Zeitpunkten erstellt. Je ein Beispiel hierzu wird in den Bildern 6.9 und 6.10 gezeigt.

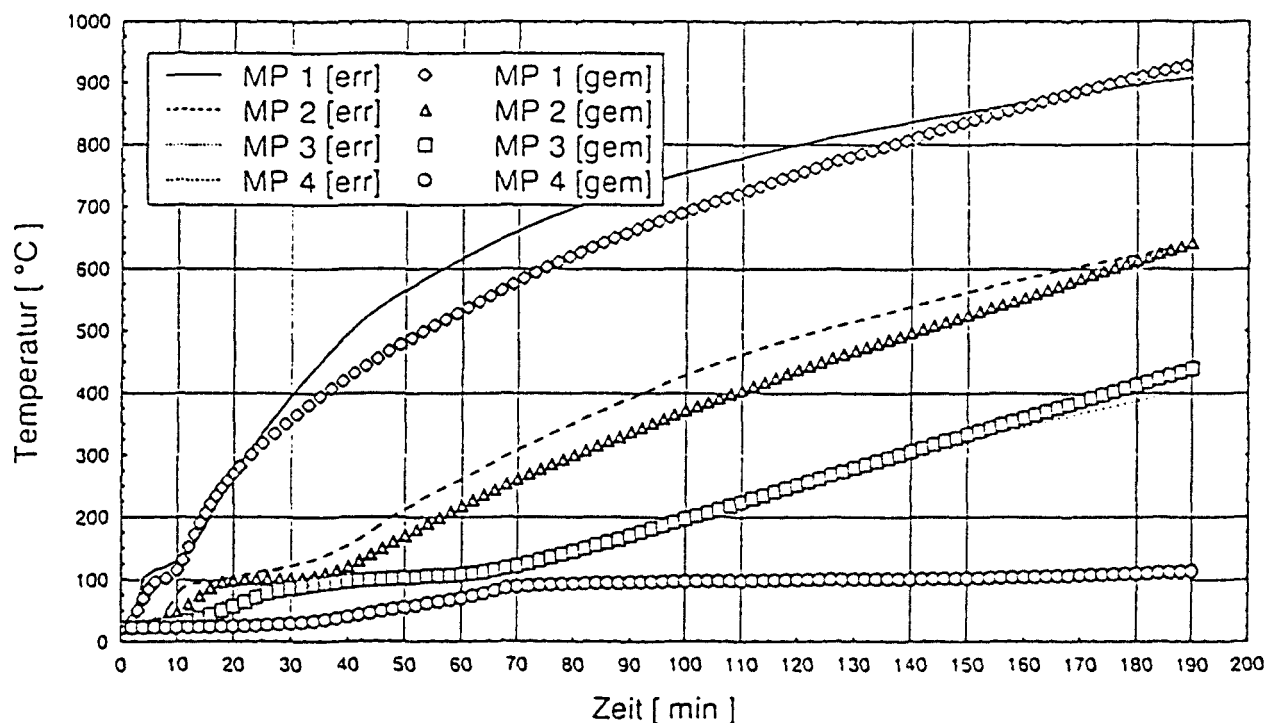


Bild 6.9: Vergleich errechneter und gemessener Temperaturen in einer 240 mm dicken Bims - Wand

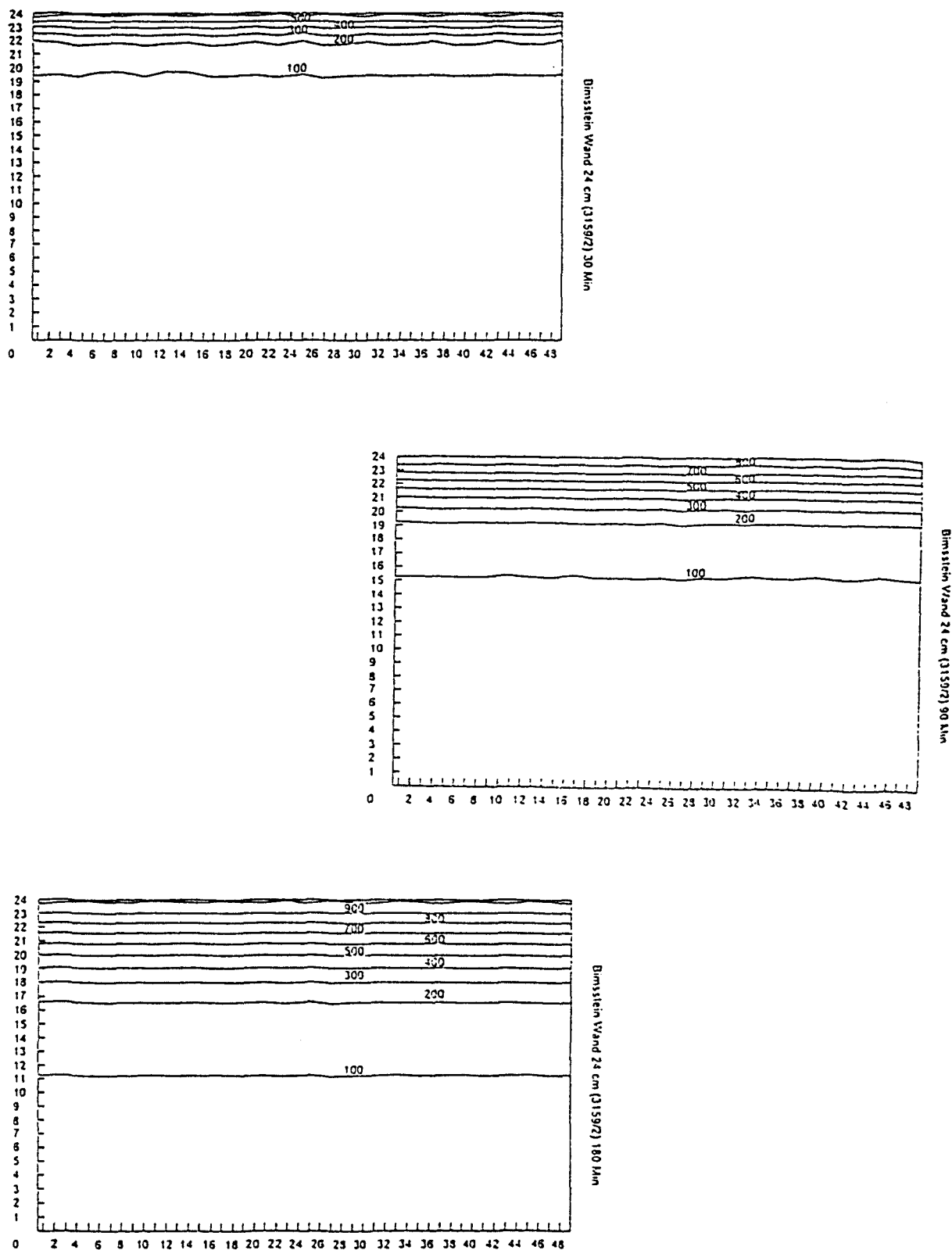


Bild 6.10: Isothermenbilder für unterschiedlich dicke Bims-  
Wände zu verschiedenen Zeitpunkten

#### 6.1.3.4 Thermische Analyse - Ziegel

In Bild 6.11 sind die ermittelten Rechenwerte für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , spezifische Wärmekapazität  $c_p$  und die Rohdichte  $\rho$  in Abhängigkeit von der Temperatur für Ziegel-Mauerwerk dargestellt.

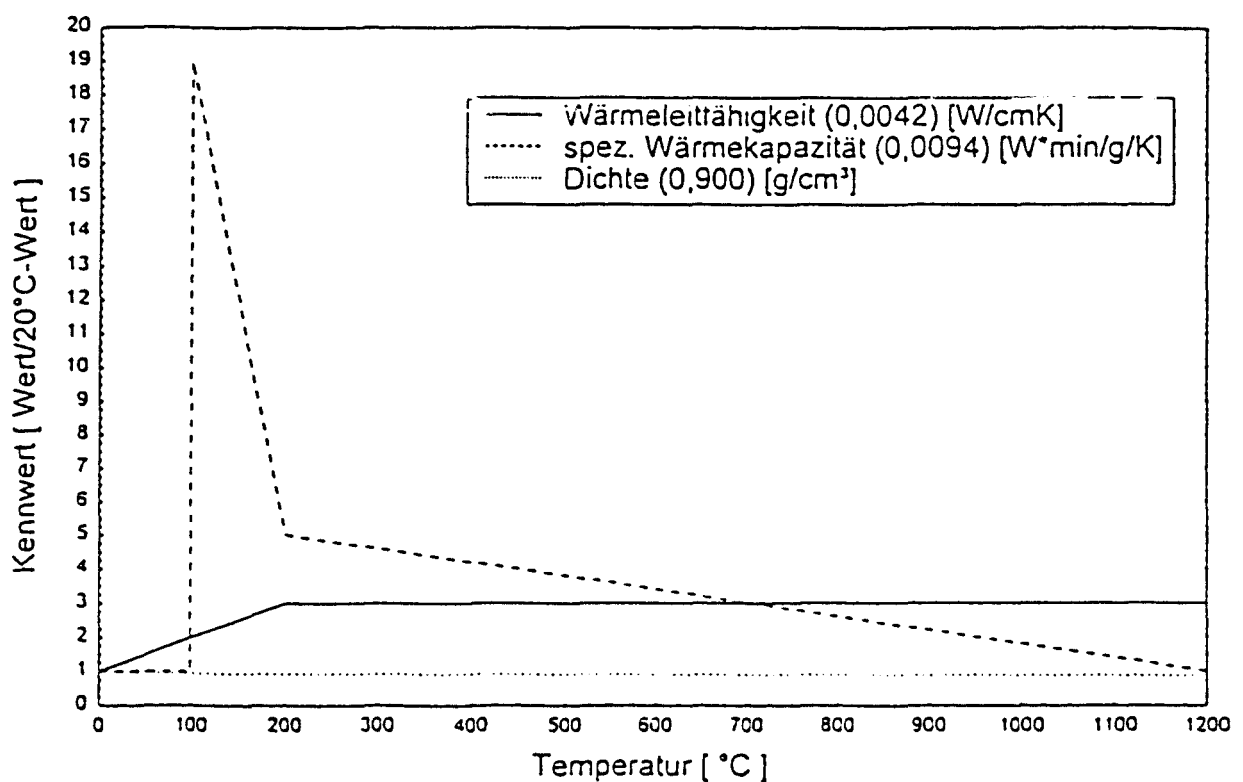


Bild 6.11: Rechenwerte der temperaturabhängigen Materialwerte von Ziegel

Deutlich erkennbar ist wiederum der Peak bei 100 °C. Mit diesen Werten wurden thermische Analysen für einige - Wände und Pfeiler mit unterschiedlichen Abmessungen - durchgeführt. Exemplarisch sind einige Ergebnisse der Nachrechnungen in den Anlagen 5.4 zusammengefaßt. Es werden Vergleiche zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen sowohl für Wände als

auch für Pfeiler graphisch dargestellt, die eine sehr gute Übereinstimmung zeigen. Außerdem wurden auf der Basis der errechneten Temperaturen Isothermenbilder für verschiedene Querschnitte, ebenfalls Wände und Pfeiler, zu verschiedenen Zeitpunkten erstellt. Je ein Beispiel hierzu wird in den Bildern 6.12 und 6.13 gezeigt.

Bei der Ermittlung der Rechenwerte gab es einige Probleme, weil nur eine sehr geringe Anzahl von verwertbaren Bauteilprüfungen als Ausgangsbasis zur Verfügung standen.

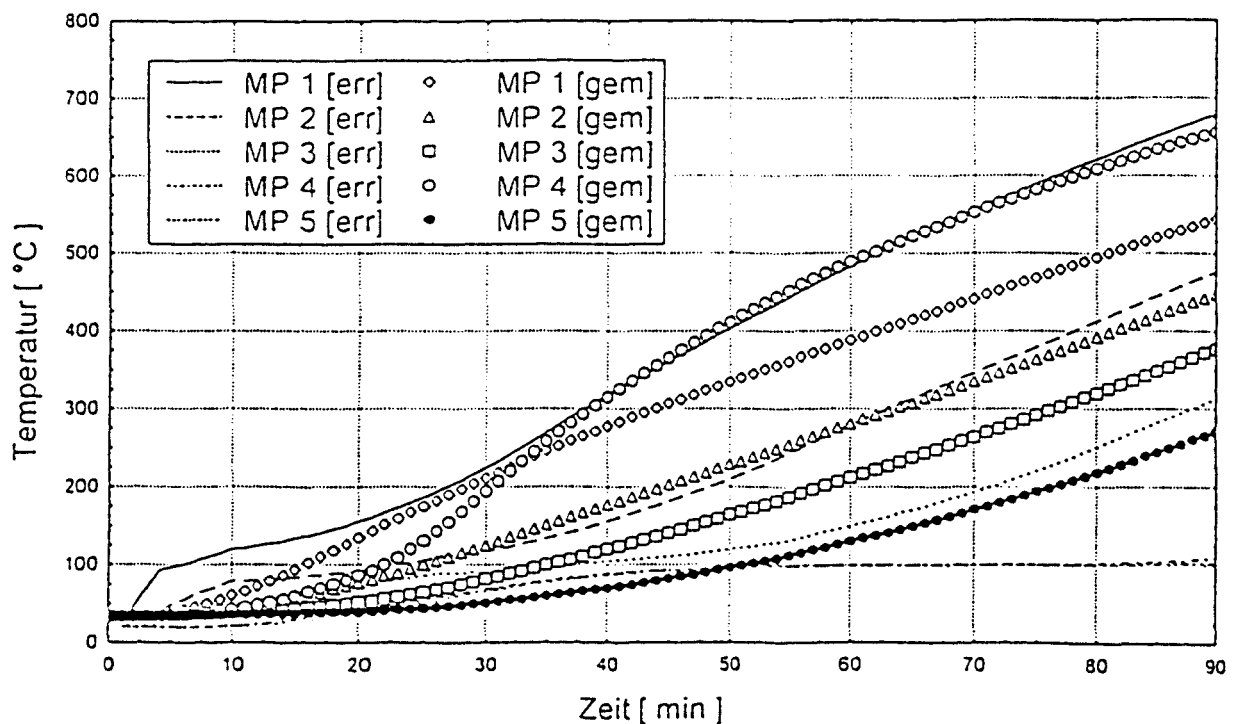


Bild 6.12: Vergleich errechneter und gemessener Temperaturen eines Ziegel - Pfeilers



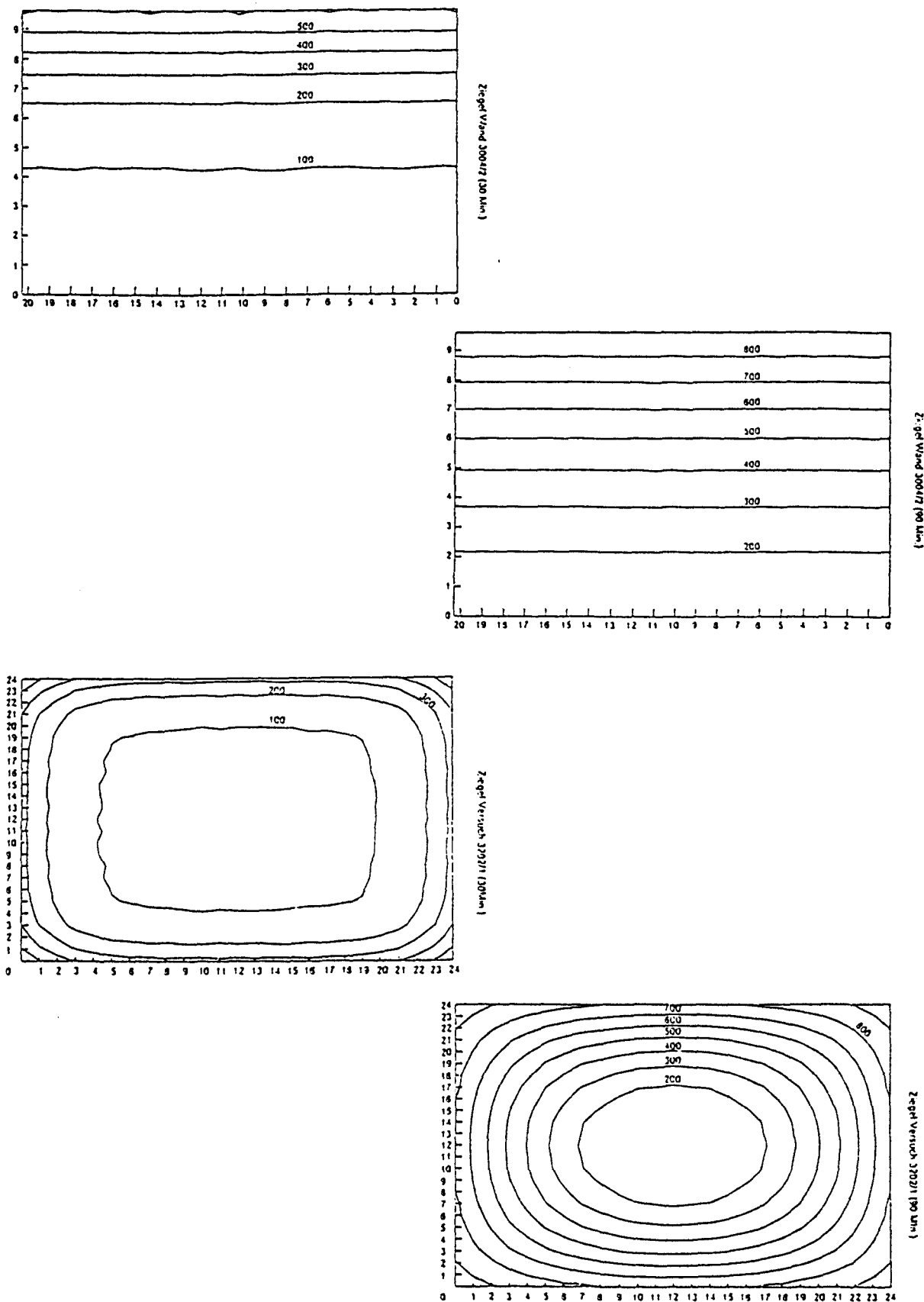


Bild 6.13: Isothermenbilder für unterschiedliche Ziegel - Wände und Pfeiler zu verschiedenen Zeitpunkten

#### 6.1.4 Verifizierung

Zur Prüfung der ermittelten Rechenwerte für die einzelnen Steinarten wurden nicht nur Nachrechnungen für die Mittelwerte mehrerer Bauteilprüfungen sondern es wurden auch Einzelprüfungen nachgerechnet. Auch hier zeigte sich eine gute Übereinstimmung.

Es muß jedoch erwähnt werden, daß für Pfeiler - vierseitige Brandbeanspruchungen - in den Randzonen teilweise andere Werte errechnet als gemessen werden. Da für die mechanische Analyse jedoch im wesentlichen der innere Querschnittsbereich eines Bauteils maßgebend ist, sind diese Abweichungen vernachlässigbar. Die Abweichungen werden wesentlich durch die Brandraumgeometrie, die vierseitige Brandbeanspruchung und die Wärmeübergangsbedingungen bestimmt.

Zur Prüfung der ermittelten Rechenwerte wurden außerdem Berechnungen durchgeführt, bei denen nur der Eingangswert der Rohdichte einer Steinart variiert wurde, um damit andere Rohdichten der gleichen Steinart nachzuweisen. Auch bei diesen Berechnungen, bei denen die Ergebnisse wiederum mit gemessenen Temperaturen verglichen wurden, wurde die Richtigkeit der ermittelten Rechenwerte bestätigt. Ein Beispiel wird in Bild 6.14 gezeigt. Die Ermittlung der Rechenwerte für Ziegelmauerwerk erfolgte mit einem Ausgangswert der Rohdichte von  $900 \text{ kg/m}^3$ . Die Rechenwerte sind auch gültig für Ziegel mit einer Rohdichte von z.B.  $1.800 \text{ kg/m}^3$  oder  $600 \text{ kg/m}^3$ .

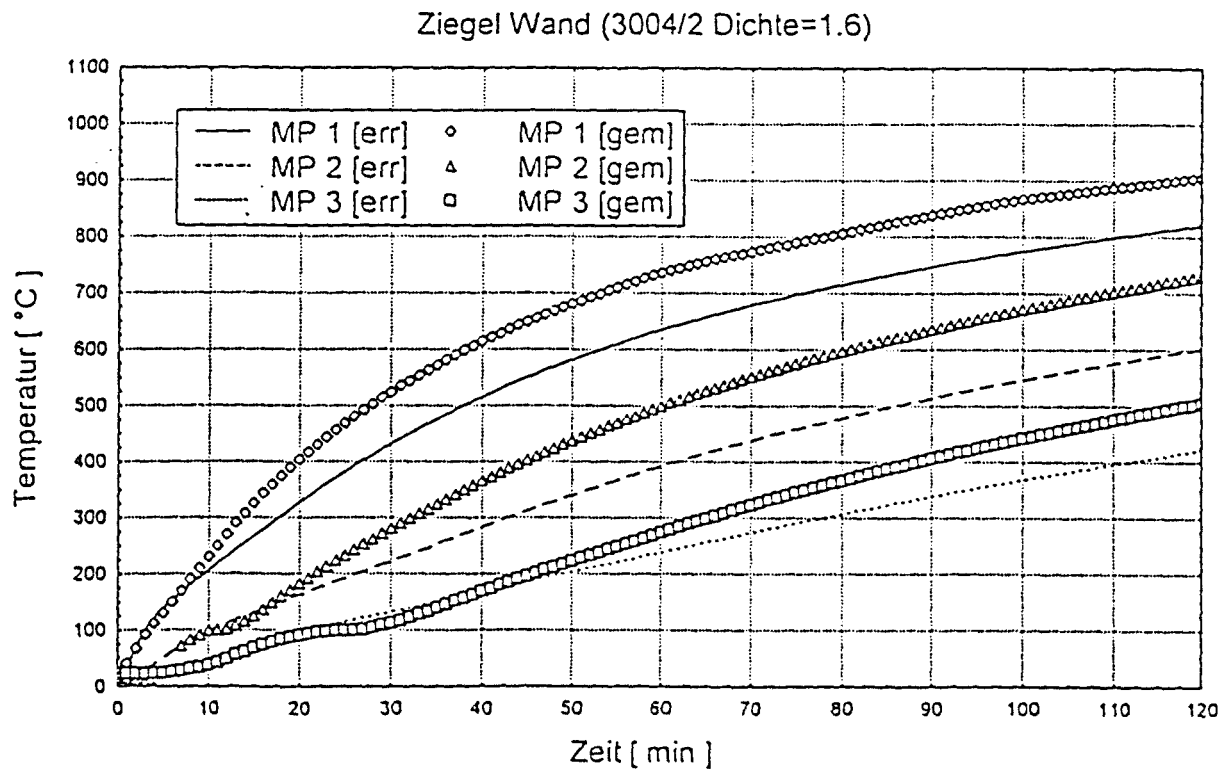
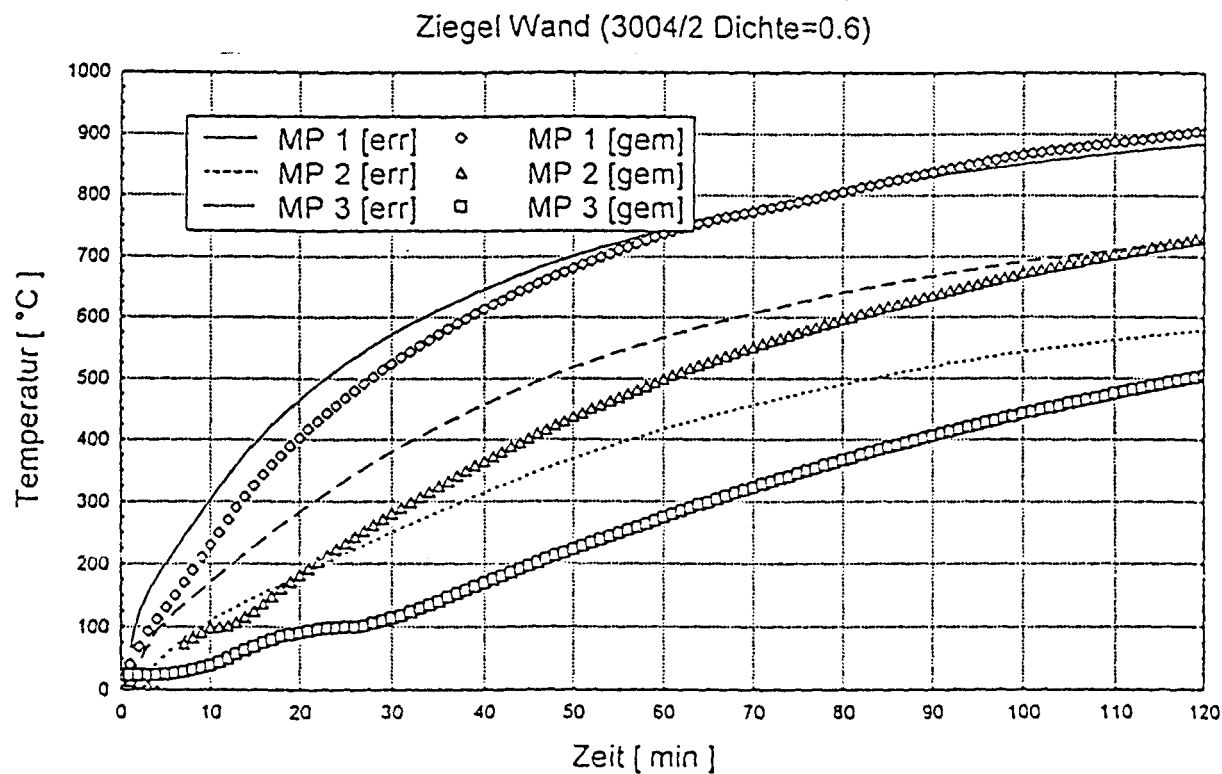


Bild 6.14: Vergleich errechneter und gemessener Temperaturen  
von Ziegel - Wänden unterschiedlicher Rohdichten

#### 6.1.5 Offene Probleme

Bei der durchgeführten thermischen Analyse wird für Mauerwerk bisher nur unterschieden zwischen den einzelnen Steinarten. Der Einfluß unterschiedlicher Mörtelarten entsprechend den Untersuchungen bei Normaltemperatur, z. B. durch eine Variation der Mörtelart (Wärmedämmmörtel) eine bessere Wärmedämmung zu erreichen, wird bisher nicht berücksichtigt. Es ist jedoch davon auszugehen, daß für die thermische Analyse unter Hochtemperaturbeanspruchung im wesentlichen der Stein maßgebend ist, weil der Fugenteil bezogen auf das Gesamtbauteil relativ gering ist. Der Einfluß bei Raumtemperatur spielt sich außerdem, verglichen mit dem Hochtemperaturbereich von 100 °C bis 1000 °C, in einem sehr kleinen Temperaturbereich von etwa - 30 °C bis + 50 °C ab und die Auswirkungen liegen, bezogen auf den Hochtemperaturbereich lediglich im Streubereich der Ergebnisse.

Bei den thermischen Analysen wurde bisher der Einfluß des Lochanteils, sowie die Lochform von Lochsteinen nicht berücksichtigt, weil einerseits die vorliegenden Bauteil-Prüfergebnisse keine eindeutigen Abhängigkeiten vom jeweiligen Lochbild ableiten lassen und andererseits die Nachrechnung der Ergebnisse mit anderen Programmen erfolgen muß. Diese zusätzliche Arbeit - Entwicklung von Materialgesetzen - konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht abgewickelt werden. Eine Temperatur verteilt sich in einem homogenen Material anders als in einem gelochten Material. Bei einem gelochten Material sind theoretischen bei jedem Übergang von Baustoff zu Loch und wieder zum Baustoff Wärmeübergangszahlen anzusetzen.

Es wäre daher wünschenswert, für Lochsteine Wärmeübergangszahlen direkt durch Klein-Versuche bei einer ETK - Brandbeanspruchung zu ermitteln.

## 6.2 Mechanische Analyse

### 6.2.1 Grundlagen

Zur mechanischen Analyse war bereits mit Antragstellung geplant das Programmsystem „STABA-F“ - STAbförmige BAuteile im Feuer -[22] einzusetzen und damit die Verformungen und Zustandsgrößen unter Hochtemperaturbeanspruchung zu ermitteln. Dieses Programm wird im iBMB bereits seit Jahren zur Ermittlung von Zustandsgrößen

- Biegemoment  $M_y$ ,
- Querkraft  $Q_z$ ,
- Verformung  $w$  und
- Stabneigung  $\varphi$

einachsig gespannter Bauteile bei vorgegebener thermischer und statischer Beanspruchung in beliebigen Bauteilquerschnitten anderer Baustoffe - Stahlbeton, Stahl, Verbund, etc. - verwendet.

Mit Hilfe des Programms können Lösungen für zwei Probleme des baulichen Brandschutzes gegeben werden:

- Ermittlung des Gleichgewichts- und Verformungszustandes eines Bauteils zu beliebig vorgebbaren Zeitpunkten  $t_i$  bei vorgegebenem Temperatur/Zeit-Verlauf der Bauteilumgebung, Belastung und Lagerungsbedingungen: Hiermit wird eine Brandprüfung rechnerisch simuliert. Die Zustandsgrößen der Bauteile werden in Zeitschritten  $\Delta t$  ermittelt. Bauteilversagen liegt vor, wenn die Grenzschnittgrößen eines Querschnitts überschritten werden (Querschnittsversagen) oder wenn kein stabiler Gleichgewichtszustand mehr möglich ist (Stabilitätsversagen).
- Ermittlung des Bauteilwiderstandes  $R(t)$  eines Bauteils mit einer Temperaturverteilung  $T(y,z)$  im Querschnitt infolge eines vorgegebenen Temperatur/Zeit-Verlaufes der

Bauteilumgebung: Zum Zwecke einer brandschutztechnischen Bemessung kann die von einem Bauteil maximal aufnehmbare Belastung ( $N_u$ ,  $M_u$ ) bei vorgegebenem Temperatur/Zeit-Verlauf der Bauteilumgebung und vorgegebener Brandeinwirkungszeit ermittelt werden. Die Lösung dieser Aufgabe kann experimentell nur bedingt erfolgen.

Das Programm STABA-F ist in drei von einander unabhängige Rechenschritte gegliedert:

1. Ermittlung der Temperaturverteilung in den vorliegenden Bauteilquerschnitten,
2. Berechnung der Momenten/Krümmungs-Beziehung für jede vorgegebene Normalkraft-Belastung und jeden ausgewählten Zeitschritt,
3. Ermittlung der Zustandsgrößen.

Die Ermittlung der Momenten/Krümmungs-Beziehung wird wie folgt durchgeführt:

Durch die Festlegung der Beziehung zwischen Querschnittskrüm-mung  $k_z$  und Biegemoment  $M_y$  bei vorgegebener Normalkraft  $N_x$  ist auch die beanspruchungsabhängige Querschnittssteifigkeit  $B$  festgelegt:

$$B = \frac{\Delta M_y}{\Delta k_z} \quad (6)$$

Der Zusammenhang zwischen Krümmung  $k_z$ , Biegemoment  $M_y$  und Längskraft  $N_x$  wird mit folgenden, vereinfachten Annahmen ermittelt:

- Es gilt die Bernoulli-Naviersche Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte,

- Es wird bis zum Überschreiten der jeweiligen Material-Zugfestigkeit Verbund zwischen Mörtel und Stein angesetzt,
- Die temperaturabhängigen Spannungs-/Dehnungsbeziehungen von Mauerwerk - Stein und Mörtel - sind nichtlinear definiert.

Zur Ermittlung der von der Längskraft abhängigen Momenten/Krümmungs-Beziehung wird das Elementraster von der Temperaturenermittlung übernommen. Zu den vorgegebenen Elementtemperaturen  $T(y,z)$  werden die thermischen Dehnungen  $\epsilon_{th}(y,z,T)$  ermittelt. Die Ergebnisse wurden mit den durchgeführten Versuche zur thermischen Dehnungen verglichen.

Durch Vorgabe der Krümmung  $k_z$  können die spannungserzeugenden Dehnungen nach Gleichung (7) ermittelt werden:

$$\epsilon_\sigma(y,z,T) = \epsilon_0 + k_z \cdot z - \epsilon_{th}(y,z,T) \quad (7)$$

Dabei wird die Dehnung  $\epsilon_0$  im Querschnittsmittelpunkt iterativ so festgelegt, daß die Einzelkräfte der  $n$  Elemente und die vorgegebene Längskraft  $N_x$  die Gleichgewichtsbedingung nach Gleichung (8) erfüllen, wobei die Krümmung  $k_z$  iterativ so lange verändert wird, bis das Gleichgewicht zwischen innerem und äußerem Moment erreicht ist (Gleichung (9)):

$$\sum_i^n A_i \cdot \sigma_i(y,z,T) = N_x \quad (8)$$

Die spannungserzeugenden Dehnungen  $\epsilon(y,z,T)$  werden über die temperaturabhängigen Spannungs-/Dehnungs-Beziehungen mit den Spannungen  $\sigma$  verknüpft.

Die Summe

$$\sum_i^n A_i \cdot \sigma_i(y,z,T) \cdot z_i = M_y \quad (9)$$

ergibt bei Vorgabe der Längskraft  $N_x$ , der Krümmung  $k_z$  und des Temperaturzustandes  $T(y,z)$  das aufnehmbare Moment  $M_y$ . Die vollständige Moment/Krümmungs-Beziehung erhält man punktweise für jeweils vorgegebene Krümmungen  $k_z$ .

Die Ermittlung der Zustandsgrößen wird wie folgt durchgeführt:

Eine zutreffende Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens von Bauteilen hat den Einfluß von mechanischen (nicht-linearen Materialverhaltens, Aufreißen der Fugen) und geometrischen (Theorie 2. Ordnung) Nichtlinearität zu berücksichtigen. Zur Ermittlung der Zustandsgrößen - Biegemoment  $M_y$ , Querkraft  $Q_z$ , Verformung  $w$  und Stabneigung  $\phi$  - wird das Reduktionsverfahren in Verbindung mit Übertragungsbedingungen angewendet.

Die beiden zunächst unbekannten Zustandsgrößen am Stabanfang müssen iterativ so bestimmt werden, daß die Verträglichkeit am Stabende erreicht wird. Die Festlegung der Steifigkeit als Gradient der Momenten/Krümmungs-Beziehung ergibt normalerweise einen stabilen und rasch konvergierenden Rechenalgorithmus. Im vorliegenden Fall gab es in diesem Bereich jedoch diverse Probleme, auf die noch eingegangen wird.

### 6.2.2 Problemstellung

Für Mauerwerk lagen bisher keine temperaturabhängigen Spannungs-/Dehnungs-Beziehungen vor. Sie mußten aus den Ergebnissen der parallel laufenden Forschungsvorhaben [13 - 16] entwickelt und auf ihre Anwendung überprüft werden. Die Ergebnisse der Baustoffuntersuchungen streuten zum Teil erheblich, so daß die Bandbreite, die den Spannungs-/ Dehnungs-Linien zugrunde zulegen waren, groß war.



Außerdem mußte abgeschätzt werden, inwieweit die Fuge im Mauerwerk und damit der Mörtel das Trag- und Verformungsverhalten des Mauerwerkes unter Hochtemperaturbeanspruchung beeinflusst.

Für die Berechnung von Mauerwerk mit dem Programm STABA-F mußte das Programm in zwei Punkten erweitert werden:

- Die Diskretisierung in Bauteillängsachse mußte dem kleinteiligen Aufbau von Mauerwerksstrukturen angepaßt werden und
- Die Programmprozeduren zur Berechnung der inneren Schnittgrößen mußten soweit neuformuliert werden, daß sie die relative Festigkeitssteigerung bei höheren Temperaturen in Verbindung mit negativen thermischen Dehnungen berücksichtigen konnten.

### 6.2.3 Umsetzung der Materialgesetze in das Rechenverfahren

#### 6.2.3.1 Allgemeine Grundlagen

Die Gesamtverformung eines Bauteils unter Hochtemperaturbeanspruchung setzt sich nach [21] aus mindestens 5 Anteilen zusammen:

- thermischen Dehnung  $\epsilon_{th}$ ,
- Schwinden  $\epsilon_s$ ,
- elastische Dehnung  $\epsilon_e$ ,
- plastische Dehnung  $\epsilon_p$ ,
- instationäre Kriechdehnung  $\epsilon_k$ .

Zur Bestimmung der Einzelanteile wurden in den parallel laufenden Baustoffuntersuchungen instationäre Kriechversuche durchgeführt, vgl. Abschnitt 4. Es wird dabei davon ausgegangen, daß die Schwindverformungen in den thermischen Dehnungen enthalten sind - eine zulässige Annahme, weil die Versuchskörper unversiegelt - geprüft werden. Außerdem kann an unbe-

lastet erwärmten Probekörpern der zur Ermittlung der elastischen Dehnungen erforderliche temperaturabhängige Elastizitätsmodul gewonnen werden. Die beiden noch nicht bestimmten Dehnungsanteile (plastische Dehnung und instationäre Kriechdehnung) ergeben sich als Differenz zwischen der thermischen Dehnung und der Summe aus gemessener Gesamtdehnung und temperaturabhängiger elastischer Dehnung. In Abschnitt 4 sind die Gesamtverformungen über der Temperatur für die einzelnen Steinarten graphisch aufgetragen. Aus den gezeigten Verformungsverläufen wird deutlich, daß die Differenz zwischen der unbehinderten thermischen Dehnung  $\epsilon_{th}$  und der durch die Belastung beeinflussten thermischen Dehnung  $\epsilon_w$ , d.h. der gemessenen Gesamtdehnung, jeweils den durch die im Versuch konstant gehaltenen Belastung verursachten Dehnungsanteil  $\epsilon$  wiedergibt. Diese Dehnungen werden als spannungserzeugende Dehnungen bezeichnet. In [21] wird ausführlich erläutert, wie aus den Versuchswerten Spannungsbezogene Dehnungslinien entwickelt werden.

Aufgrund der umfangreichen Datenfülle und der sehr unterschiedlichen Verhältnisse bei den einzelnen Steinarten wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens, zwei unterschiedliche Steinarten für die Verifizierung des Rechenverfahrens ausgesucht. Hierfür wurde einerseits Mauerwerk aus Porenbeton ausgewählt, weil er ohne Löcher aufgrund seiner Porenstruktur ein sehr homogener Baustoff ist und weil sich bei der Ermittlung der Materialkennwerte als absolut neues Phänomen herausstellte, daß Porenbeton bei höheren Temperaturen Festigkeitssteigerungen erfuhr. Andererseits wurde Mauerwerk aus Kalksandstein ausgewählt, weil die Steine bereits bei Normaltemperatur wesentlich höhere Festigkeiten und Rohdichten als Porenbeton aufweisen und damit einen anderen Bereich für Mauerwerk abdecken. Außerdem werden Kalksandsteine auch als Lochsteine eingesetzt. Für die anderen beiden Steinarten - Leichtbeton und Ziegel - werden nur die ermittelten Spannungs-/Dehnungslinien vorgestellt.

### 6.2.3.2 Porenbeton

Wie bereits erwähnt, ergaben sich für Porenbeton ungewöhnliche Ergebnisse für die Spannungs-/Dehnungswerte. Im Bild 6.18 werden die Rechenwerte für die Spannungs-/Dehnungslinien als bezogenen Werte für Porenbeton graphisch dargestellt. Diese Kurven wurden aus den Versuchsergebnissen der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche und Warmkriechversuche, vgl. Bilder 6.15 und 6.16, entwickelt.

Die Kurven wurden in Anlehnung an die Formulierungen im Eurocode 2 Teil 1-2 nach Gl. (10) (Index Pb für Porenbeton) definiert:

$$\sigma_{Pb}(T) = f_{Pb}(T) \cdot \left[ \frac{\epsilon_{Pb}(T)}{\epsilon_{Pb1}(T)} \cdot \frac{3}{2 + \left[ \frac{\epsilon_{Pb}(T)}{\epsilon_{Pb1}(T)} \right]^3} \right] \quad (10)$$

mit  $f_{Pb}(T)$  max. Druckfestigkeit bei  $\epsilon_{Pb1}(T)$   
 $\epsilon_{Pb1}(T)$  Stauchung bei  $f_{Pb}(T)$   
 $\epsilon_{Pb}(T)$  Stauchung bei  $\sigma_{Pb}(T)$

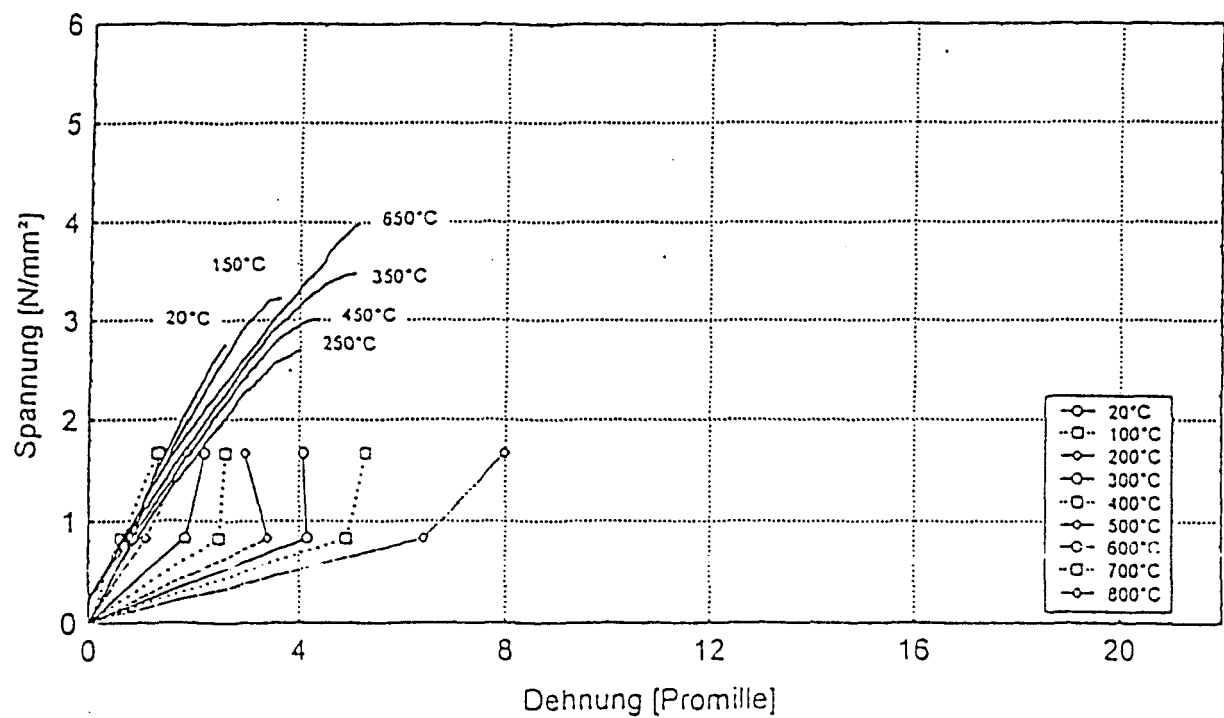


Bild 6.15: Vergleich  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche (—) / umgerechneten Warmkriechversuchen (—•—) für P2-0,5

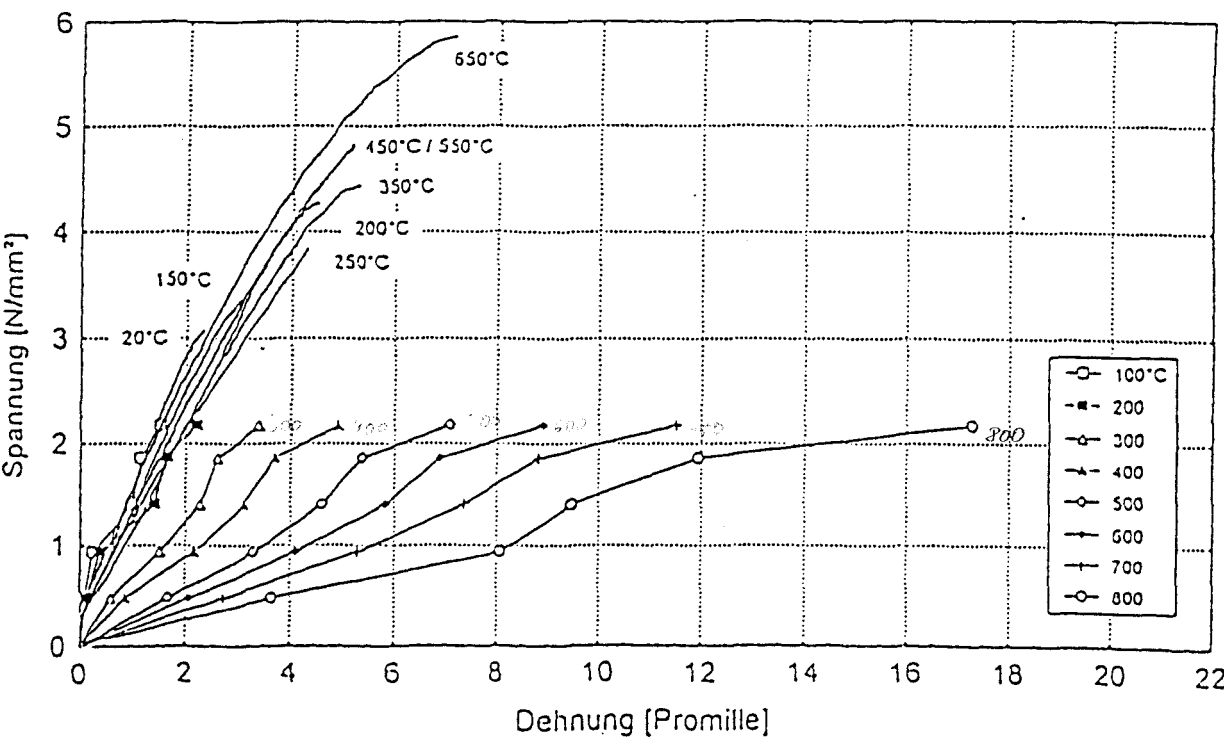


Bild 6.16: Vergleich  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche (—) / umgerechneten Warmkriechversuchen (—•—) für P4-0,6

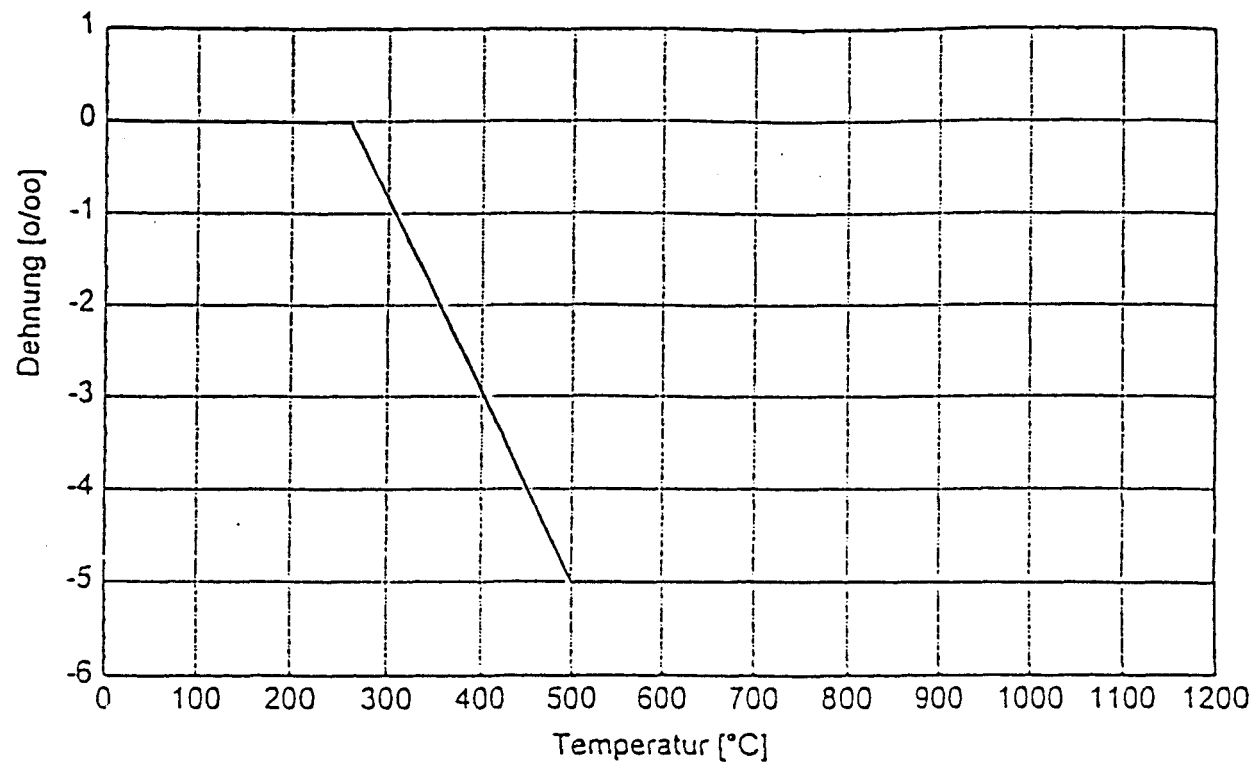


Bild 6.17: Rechenwerte der thermischen Dehnung für Porenbeton

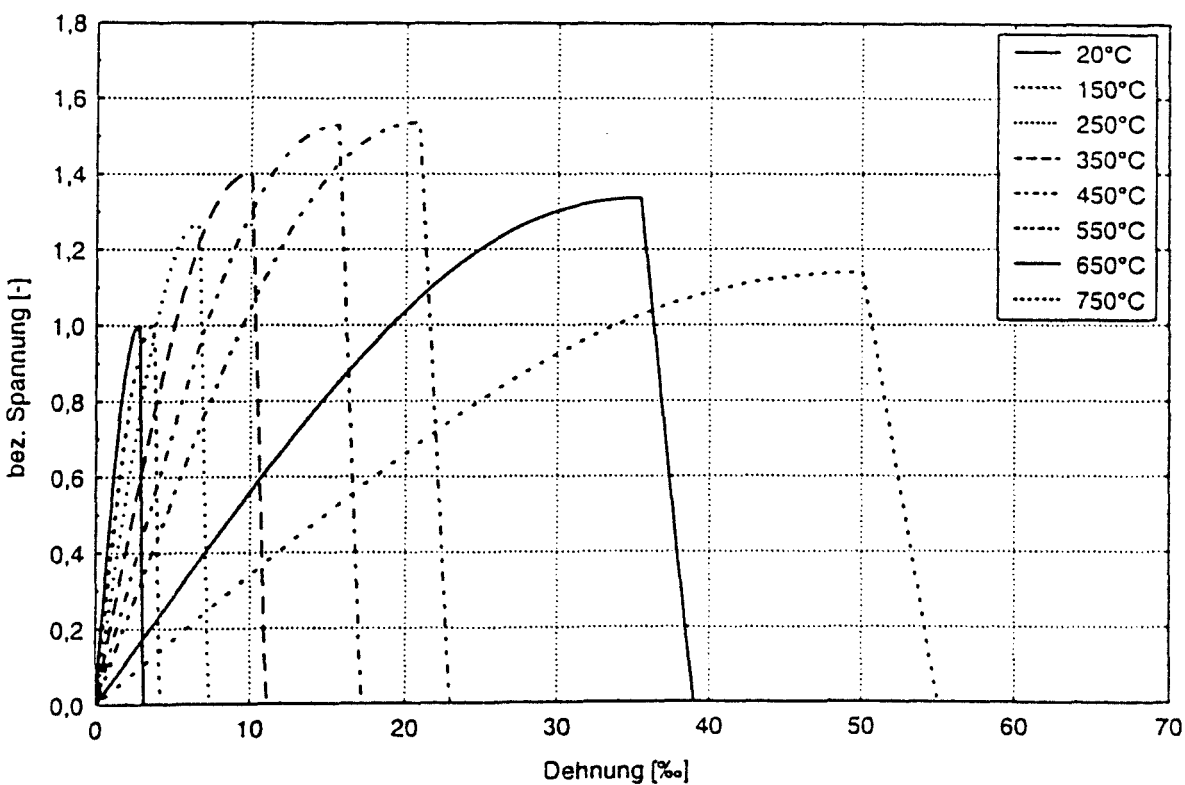


Bild 6.18: Rechenwerte für temperaturabhängige Spannungs-/dehnungslinien für Porenbeton

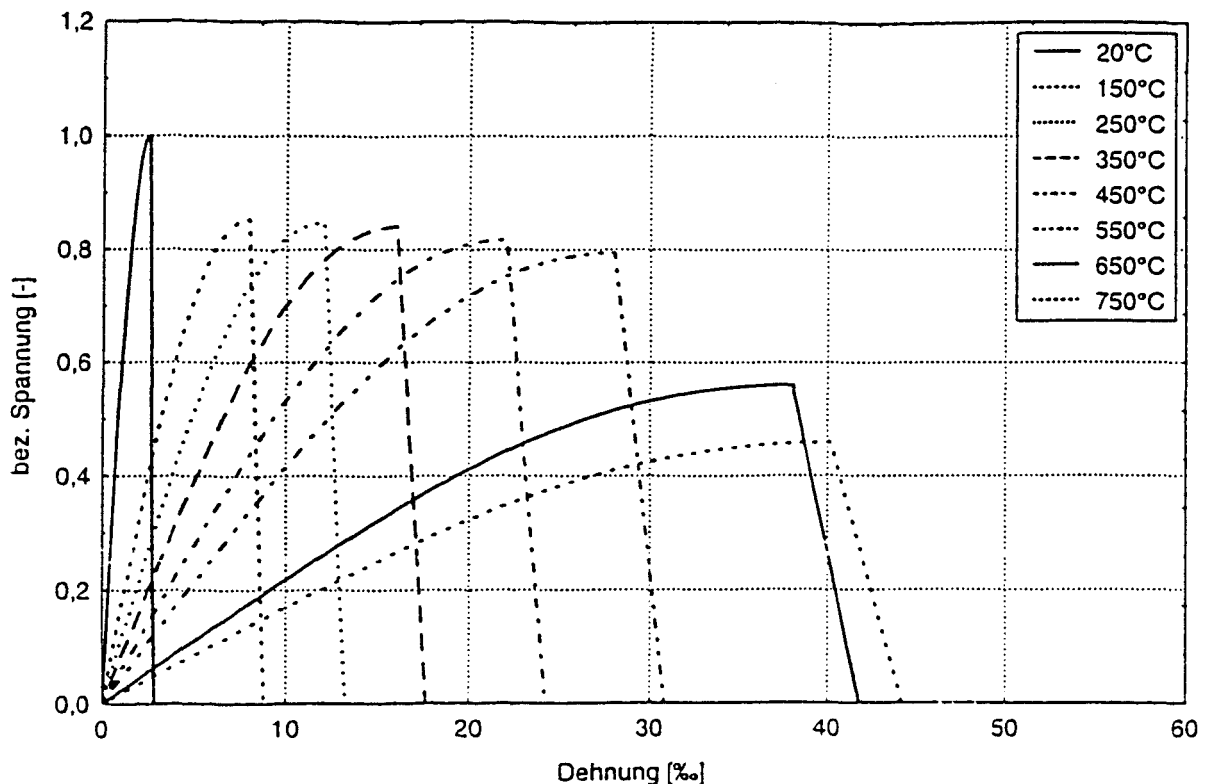


Bild 6.19: Rechenwerte für temperaturabhängige Spannungs-/Dehnungslinien für Normalmörtel

Es wurde Porenbeton-Mauerwerk, vermauert mit Dünnbettmörtel und mit Normalmörtel, für die Berechnung verwendet. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen an den Mauerwerksabschnitten und aufgrund der vorliegenden Prüferfahrungen an Bauteilen, wurde Porenbeton-Mauerwerk vermauert mit Dünnbettmörtel als homogener Baustoff ohne Berücksichtigung des Mörtels angesetzt. Hinzu kommt, daß die Fuge bei Dünnbettmörtel sehr gering ist und der Baustoff - Dünnbettmörtel - eine sehr gute Verbundwirkung hat. Für Mauerwerk mit Normalmörtel wurden die Rechenwerte nach Bild 6.18 und 6.19 zugrundegelegt. Hierfür wurden die Bauteile in einzelne Baustoffabschnitte, entsprechend dem Aufbau von Mauerwerk - Stein, Fuge, Stein, etc. -, eingeteilt und mit dem jeweiligen Materialgesetz versehen.

Für die anzusetzende thermische Dehnung werden die Rechenwerte nach Bild 6.17 eingesetzt. Deutlich wird die relativ große Stauchung im Temperaturbereich von etwa 250 °C bis 500 °C.

In der Tabelle 6.3 werden einige Rechenergebnisse zusammengefaßt und mit den Ergebnissen von Bauteilprüfungen verglichen.

Bauteil	Abmessungen	Brand- bean- spru- chung	Auf- last	Aus- nut- zungs- faktor	Versagenszeit	
	d x b x h				[min]	
	[cm]		[kN]	$\alpha$	Versuch	Berech- nung <sup>1)</sup>
						gelen- kig
Wand PP2 -DB	11,5x100x300	ein- seitig	23,0	1,0	57	36-40
Wand PP2 -DB	11,5x100x300	ein- seitig	13,8	0,6	64	51-60
Wand PP4 -DB	11,5x100x300	ein- seitig	41,4	1,0	48	31-40
Wand PP4 -DB	11,5x100x300	ein- seitig	25,3	0,6	57	41-50
Wand PP2 -DB	17,5x100x300	ein- seitig	117	1,0	64	66-70
Wand PP2 -DB	17,5x100x300	ein- seitig	70	0,6	180	76-100
Wand PP2 -DB	20x100x300	ein- seitig	80	0,6	>180	126 -180
Wand PP2 -DB	24x100x300	ein- seitig	120	1,0	>90 <sup>2)</sup>	151 -180
Wand PP2 -DB	30x100x300	ein- seitig	180	1,0	>90 <sup>2)</sup>	231 -240

- 1) erste Zahl: Tragfähigkeit rechnerisch nachgewiesen  
 zweite Zahl: Versagen rechnerisch eingetreten  
 2) Brandwand: mechanische Prüfung mit Pendelstoß nach DIN  
 4102-2 nach 90 Minuten Brandbeanspruchung

Tabelle 6.3: Rechenergebnisse mit STABA-F für Porenbeton-  
 Wände (Beispiele)

In dieser Tabelle sind nur Ergebnisse für Wände zusammengefaßt. Die berechneten Versagenszeiten liegen in der Regel unterhalb der in der Prüfung gemessenen Versagenszeit; insgesamt ist eine ausreichende Übereinstimmung festzustellen.

Für Porenbetonpfeiler liegen aus dem Bereich der Industrieprüfungen nur 4 Prüfergebnisse vor, die sehr weit streuen und von der Systematik und auch aufgrund der Prüferfahrung nicht zusammenpassen. In dem dazugehörigen Prüfzeugnis wurden daher die Ergebnisse relativ weit heruntergestuft, s. Bild 19.1. Daraus ergibt sich für die geprüften Porenbetonpfeiler bei einem Ausnutzungsfaktor von  $\alpha = 1,0$  die Klassifizierung F 60 und bei  $\alpha = 0,6$  die Klassifizierung F 120.

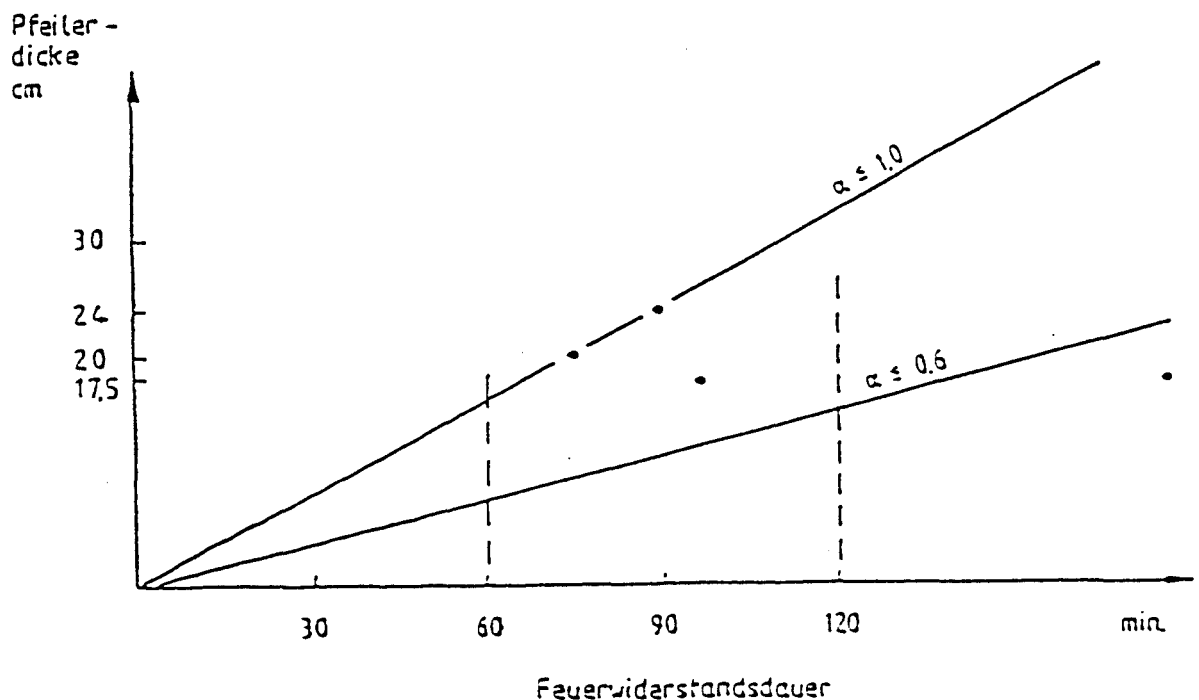


Bild 6.19-1: Klassifizierung geprüfter Porenbetonpfeiler (aus Prüfzeugnis Nr. 3342/2632 -Hn/Rm-)

Bei der Berechnung wurden die Pfeiler mit zentrischer Belastung und vollständiger Verdrehungsbehinderung beider Auflager nachgerechnet. Der Prüfaufbau weicht gegenüber diesen idealisierten Annahmen insofern ab, daß Maßungenauigkeiten in den Probekörpern und Einbautoleranzen beim Prüfaufbau auftreten. Beide Effekte führen dazu, daß die in der Prüfung er-



zielte Feuerwiderstandszeit deutlich geringer ausfällt als die entsprechende Versagenszeit in der Berechnung. Als weitere Ursache für die teilweise gravierenden Unterschiede zwischen experimentellen und berechneten Ergebnissen - insbesondere bei Porenbetonpfeilern - wird der Umstand angesehen, daß bisher mit einaxialen Materialgesetzen gerechnet werden mußte. Sie können das komplexe innere Tragverhalten brandbeanspruchter Mauerwerksstrukturen nur unvollständig abbilden. Analysen der Rechenergebnisse für Porenbetonpfeiler deuten darauf hin, daß beispielsweise der Einfluß der temperaturabhängigen Querkzugfestigkeit nicht vernachlässigt werden darf.

In den Bildern 6.20 und 6.21 ist die mit STABA-F berechnete zentrische Tragfähigkeit über der Branddauer für Porenbetonwände und -pfeiler dargestellt.

Der Verlauf der Kurven wird durch die Festigkeitssteigerungen bei höheren Temperaturen wesentlich beeinflusst.

Beim Aufheizen des Bauteils nimmt die zentrische Tragfähigkeit in Abhängigkeit von den Bauteilabmessungen ab. Bei dünnen Bauteilen steigt sie dann frühzeitig aufgrund der Festigkeitssteigerungen bei höheren Temperaturen wieder an. Der Anstieg geschieht solange bis das Bauteil soweit durchwärmt bzw. aufgeheizt ist, daß die Festigkeit fällt und das Bauteil versagt.

Deutlich wird der Unterschied zwischen dem Tragverhalten von Wänden und Pfeiler aufgrund der ein- bzw. vierseitigen Brandbeanspruchung. Bei vierseitig brandbeanspruchten Bauteilen wirkt sich die Festigkeitssteigerung deutlich aus.

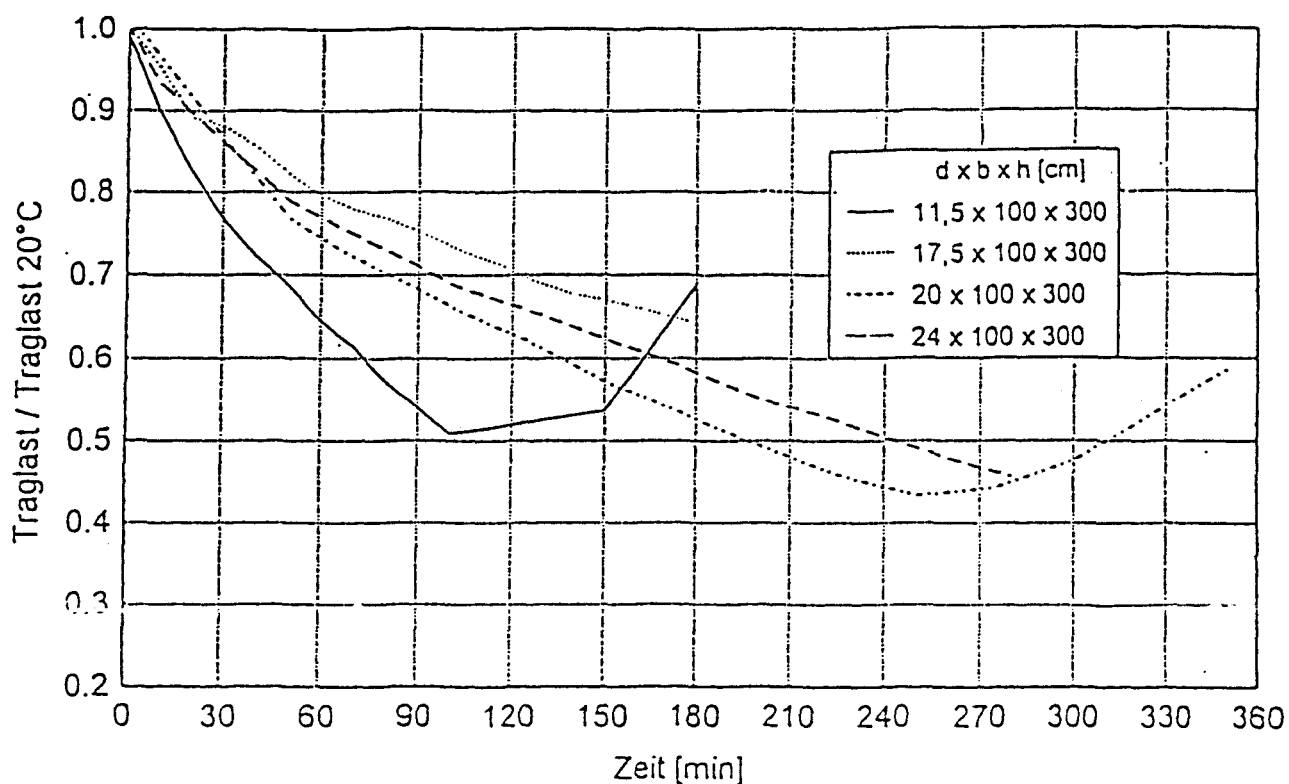


Bild 6.20: Maximale Traglast für Porenbeton-Wände in Abhängigkeit vom Temperatur/Zeit-Verlauf

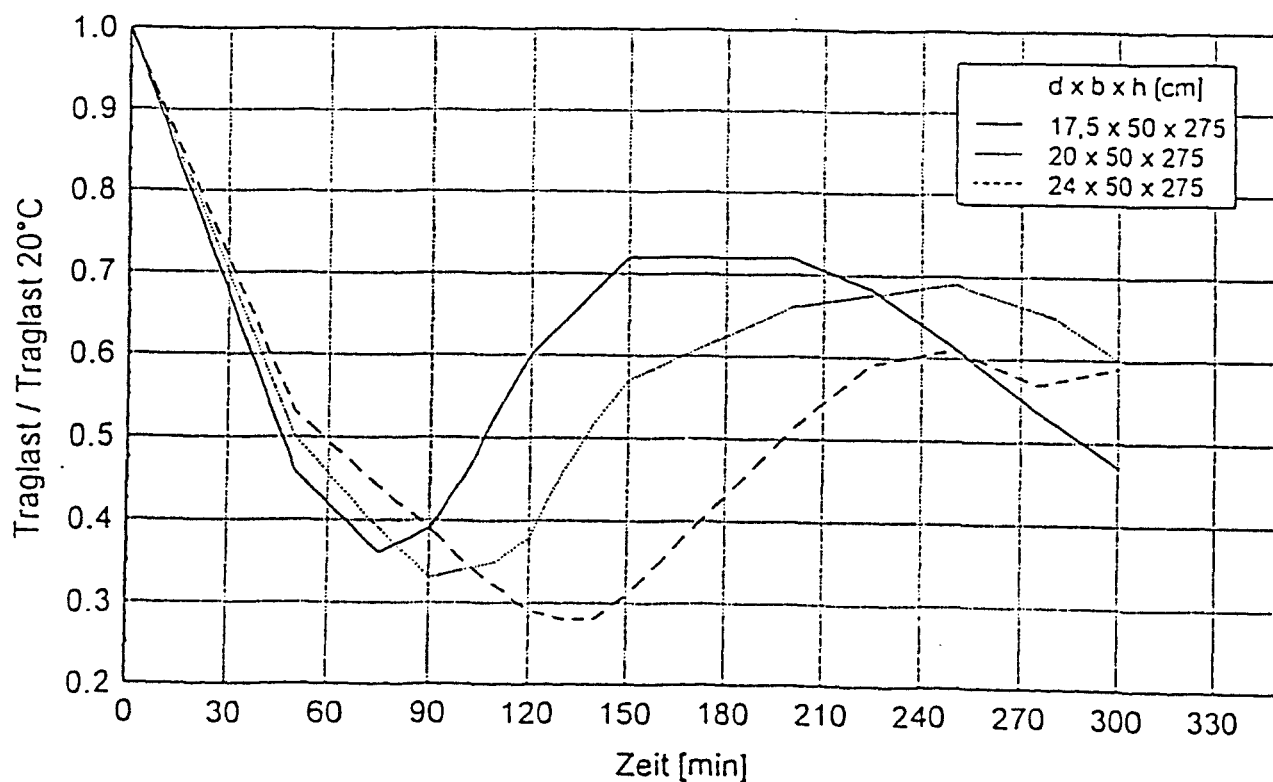


Bild 6.21: Maximale Traglast für Porenbeton-Pfeiler in Abhängigkeit vom Temperatur/Zeit-Verlauf

#### 6.2.3.3 Kalksandstein

Im Bild 6.25 werden die Rechenwerte für die Spannungs-/Dehnungslinien als bezogenen Werte für Kalksandsteine graphisch dargestellt. Diese Kurven wurden aus den Versuchsergebnissen der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche und Warmkriechversuche, vgl. Bilder 6.22 und 6.23, entwickelt.

Die Kurven wurden in Anlehnung an die Formulierung im Euro-code 2-1-2 für Beton nach Gl. (11) (Index KS für Kalksandstein) definiert:

$$\sigma_{KS}(T) = f_{KS}(T) \cdot \left[ \frac{\epsilon_{KS}(T)}{\epsilon_{KS1}(T)} \cdot \frac{5}{4 + \left[ \frac{\epsilon_{KS}(T)}{\epsilon_{KS1}(T)} \right]^4} \right] \quad (11)$$

Für die Bedeutung der Bezeichnungen siehe Erläuterungen zu Gl. (10).

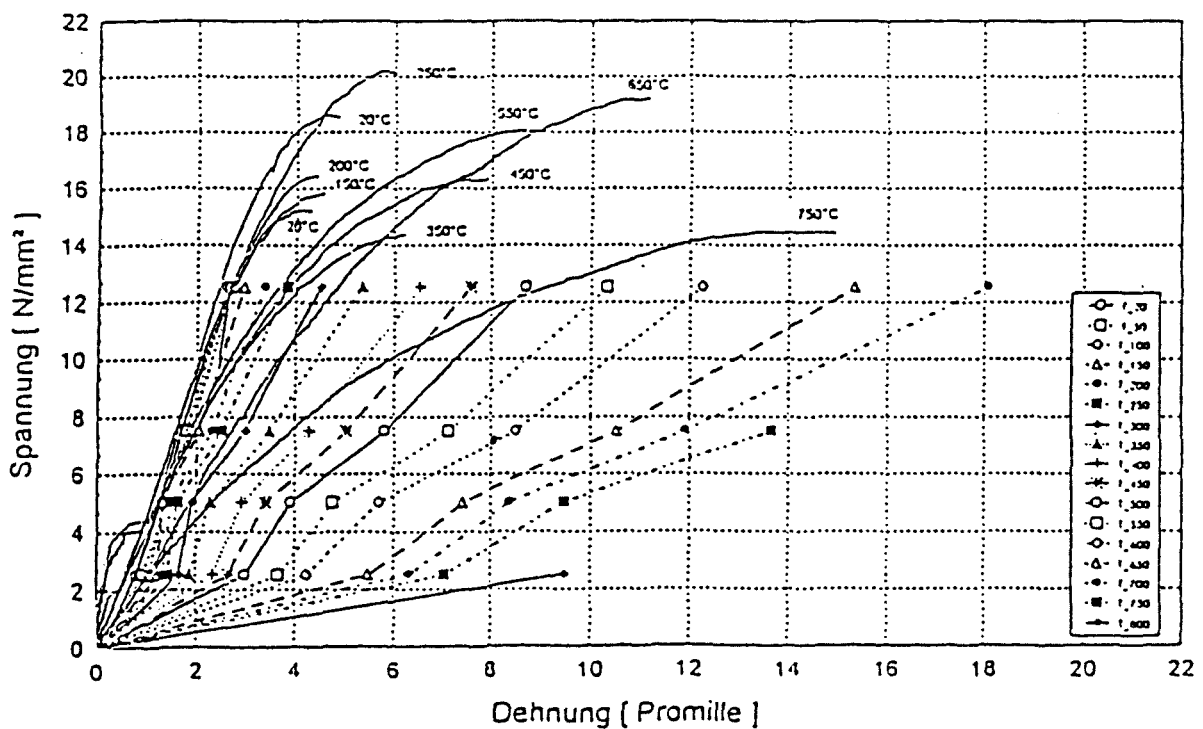


Bild 6.22: Vergleich  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche (---) und Warmkriechversuche (---●---) für KS

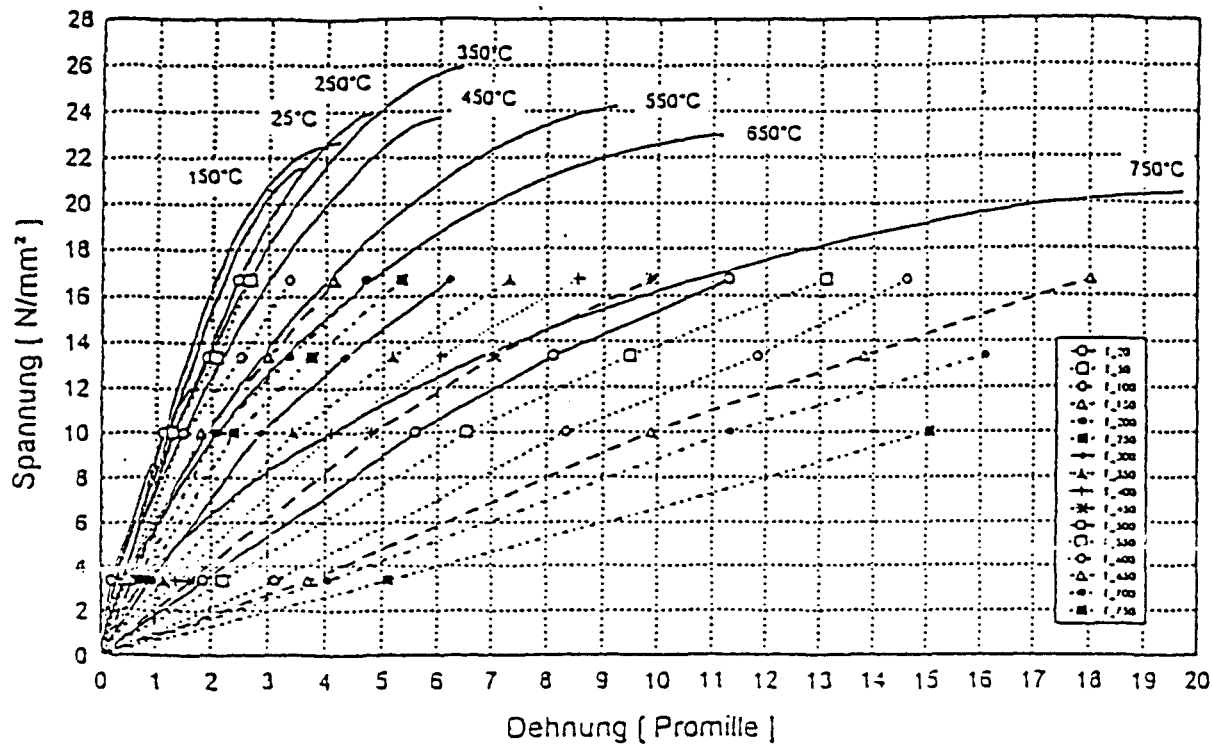


Bild 6.23: Vergleich  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche (---) und Warmkriechversuche (---•---) für KSL

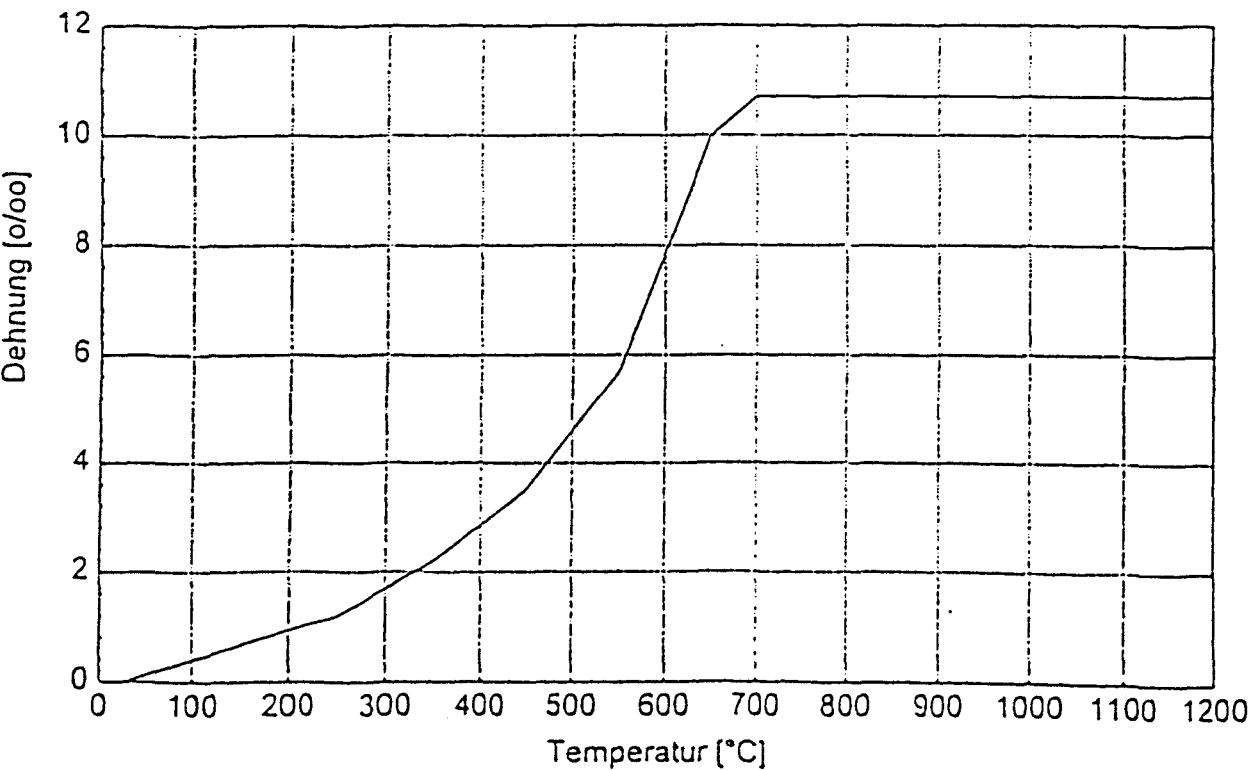


Bild 6.24: Rechenwerte der thermischen Dehnung für Kalksandstein

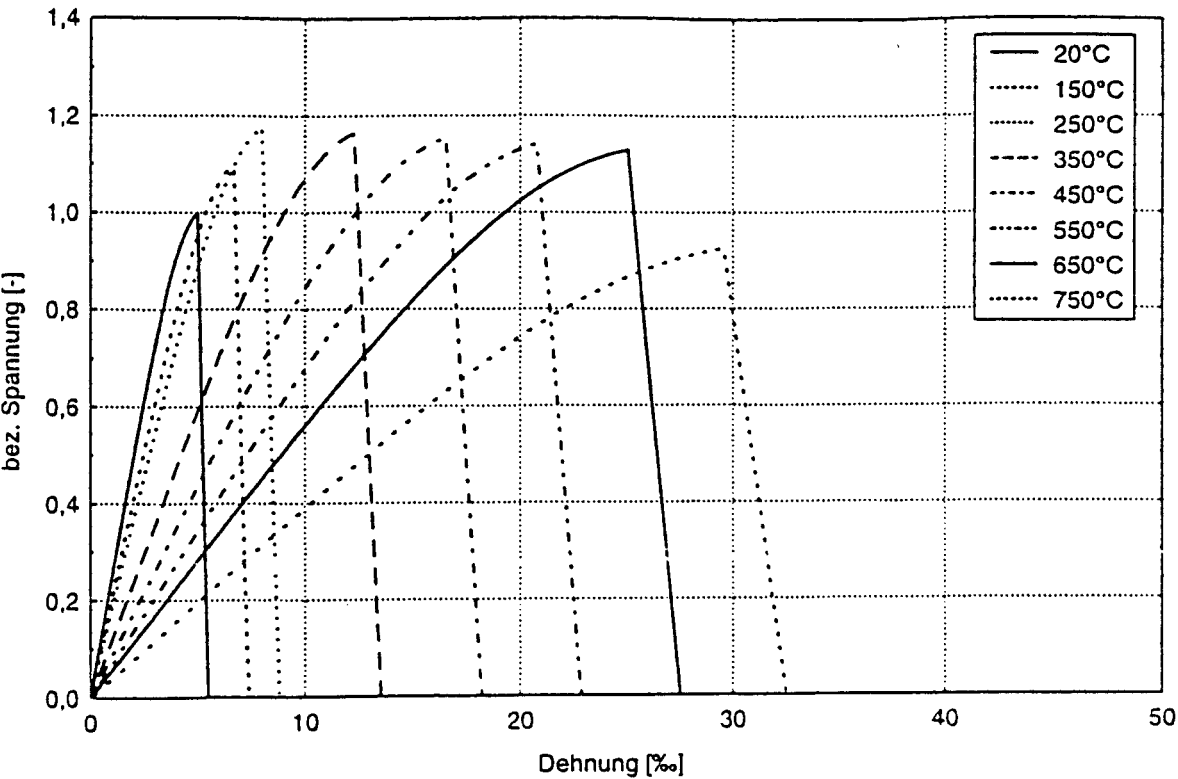


Bild 6.25: Rechenwerte für temperaturabhängige Spannungs-  
/Dehnungslinien für Kalksandvollstein

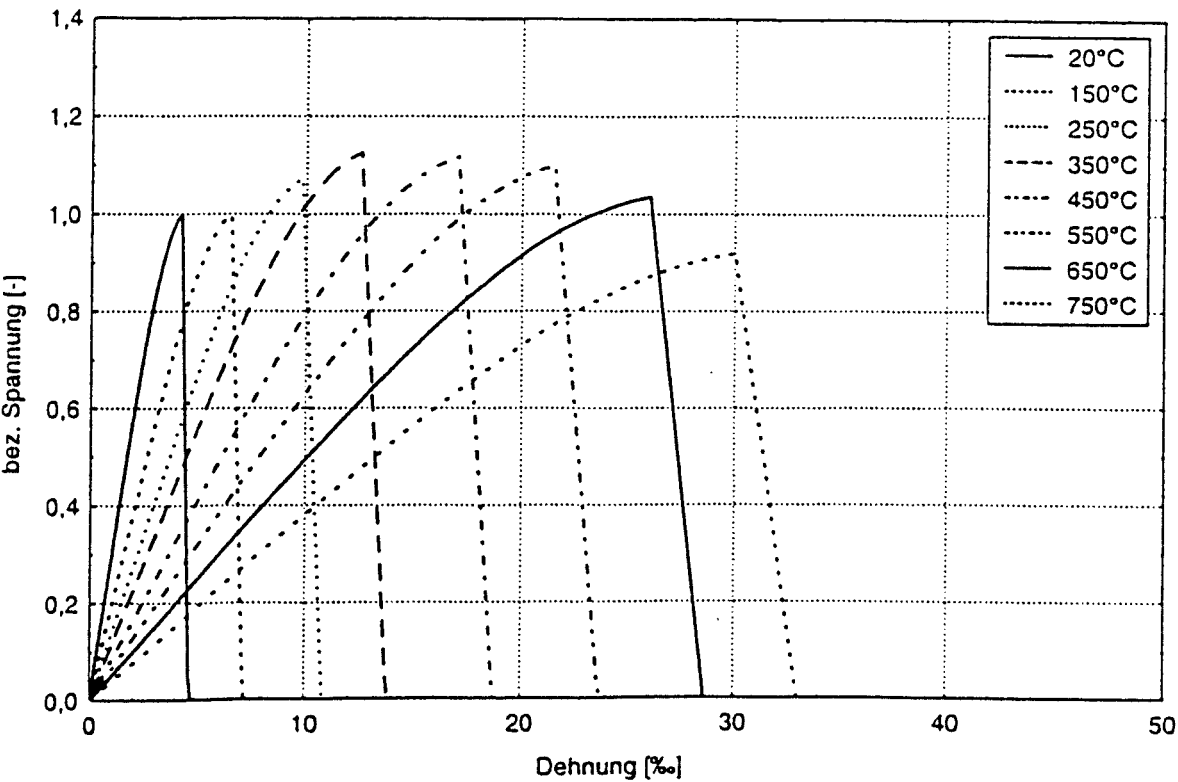


Bild 6.26: Rechenwerte für temperaturabhängige Spannungs-  
/Dehnungslinien für Kalksandlochstein

Es wurde Kalksandstein-Mauerwerk, vermauert mit Dünnbettmörtel und mit Normalmörtel, für die Berechnung verwendet. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen an den Mauerwerksabschnitten und der vorliegenden Prüferfahrungen an Bauteilen, wurde auch Kalksandstein-Mauerwerk, vermauert mit Dünnbettmörtel, als homogener Baustoff ohne Berücksichtigung des Mörtels angesetzt. Dieses beruht darauf, daß die Fuge bei Dünnbettmörtel sehr gering ist und der Baustoff - Dünnbettmörtel - eine sehr gute Verbundwirkung hat.

In der Tabelle 6.4 werden einige Rechenergebnisse zusammengefaßt und mit den Ergebnissen von Bauteilprüfungen verglichen.

Bauteil	Abmessungen d x b x h	Brand- bean- spru- chung	Auf- last	Aus- nut- zungs- faktor	Versagenszeit	
					[min]	
	[cm]		[kN]	$\alpha$	Versuch	Berech- nung <sup>1)</sup>
Wand KSPE 20-DB	17,5x100x300	ein- seitig	264	1,0	>90 <sup>2)</sup>	140 - 150
Wand KS 48-NM IIa	11,5x100x300	ein- seitig	103	0,67	135	70 -90

1) erste Zahl: Tragfähigkeit rechnerisch nachgewiesen

zweite Zahl: Versagen rechnerisch eingetreten

2) Brandwand: mechanische Prüfung mit Pendelstoß nach DIN

4102-2 nach 90 Minuten Brandbeanspruchung

Tabelle 6.4: Rechenergebnisse mit STABA-F für Kalksandstein  
(Beispiele)

Im übrigen gelten die gleichen Aussagen wie für Porenbeton-Mauerwerk. Es fehlen noch Untersuchungen zum biaxialen Materialverhalten, um alle Phänomene des Brandverhaltens von Mauerwerk hinreichend beschreiben zu können. Z.B. das Zugverhalten von Mauerwerk wird bisher nicht berücksichtigt. Es sind jedoch insbesondere im Brandfall Querkzugkräfte, die das Verhalten beeinflussen.

Läßt man Einzelergebnisse der Berechnungen mit STABA-F, z.B. das Traglastverhalten von Pfeilern in Abhängigkeit von der Zeit und Temperatur, graphisch darstellen, so zeigen sich sehr interessante Verhältnisse, vgl. Bild 6.27.

Deutlich wird der Unterschied zwischen dem Tragverhalten von Porenbeton- und Kalksandstein - Pfeilern bei vierseitiger Brandbeanspruchung. Bei den Porenbeton-Pfeilern zeigt sich die Festigkeitssteigerung bei erhöhten Temperaturen deutlich in einem Anstieg der Traglast nach einem anfänglichen starken Absinken bis zu einem Maximum von etwa 70 %, vgl. Bild 6.21. Bei den Kalksandstein-Pfeilern verringert sich die aufnehmbare Traglast wesentlich langsamer und die Festigkeitssteigerung bei erhöhten Temperaturen führt nur zu einer Verzögerung des Absinken der Traglast bei etwa 60% - 70%. Bei sehr dünnen Pfeilern erfolgt aufgrund der schnelleren Erwärmung des Gesamtquerschnittes keine Verzögerung.

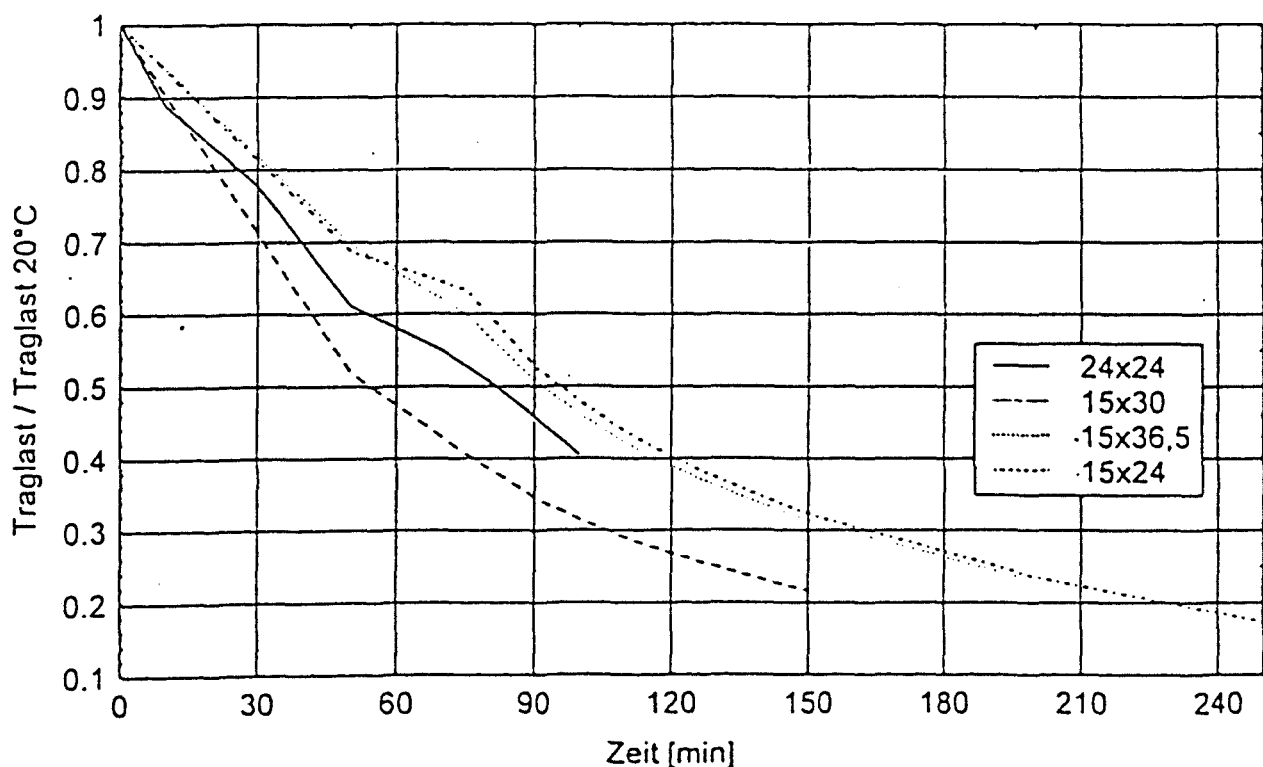


Bild 6.27: Maximale Traglast für Kalksandstein-Pfeiler in Abhängigkeit vom Temperatur/Zeit-Verlauf

6.2.3.4 Leichtbeton

Wie bereits erwähnt werden für Leichtbeton-Mauerwerk nur die Rechenwerte für temperaturabhängige Spannungs-/Dehnungslinien vorgestellt.

Die Kurven zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen, die im Rahmen des Sonderforschungsbereich 148 für Bauteile aus Konstruktionsleichtbeton entwickelt wurden, vgl. Bilder 6.31 und 6.32.

Mit zunehmender Temperatur fallen die Festigkeitswerte. Dieses Verhalten entspricht dem bereits bekannten und sehr intensiv untersuchtem Verhalten von Normalbeton. Lediglich die Einzelwerte unterscheiden sich.

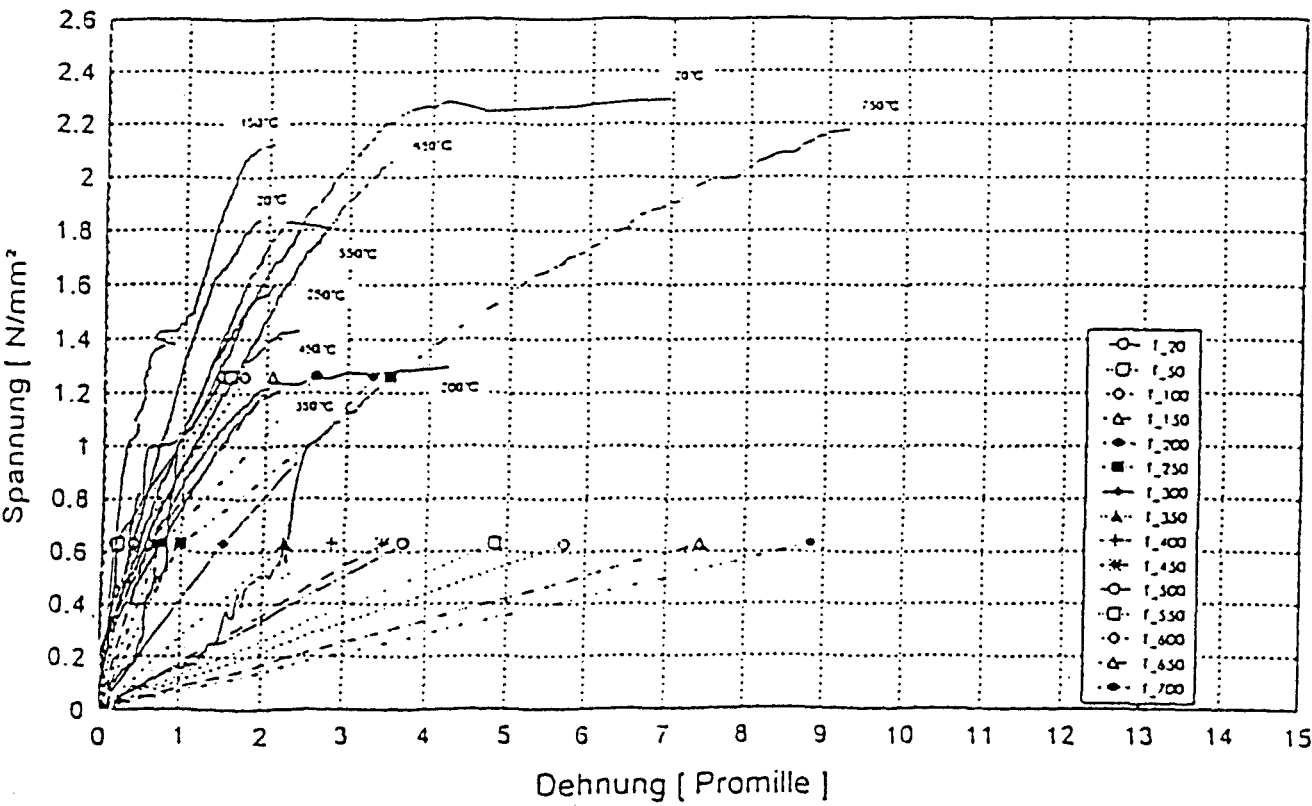


Bild 6.28: Vergleich  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche (---) / umgerechnete Warmkriechversuche (---●---) für Leichtbeton-Vollblöcke



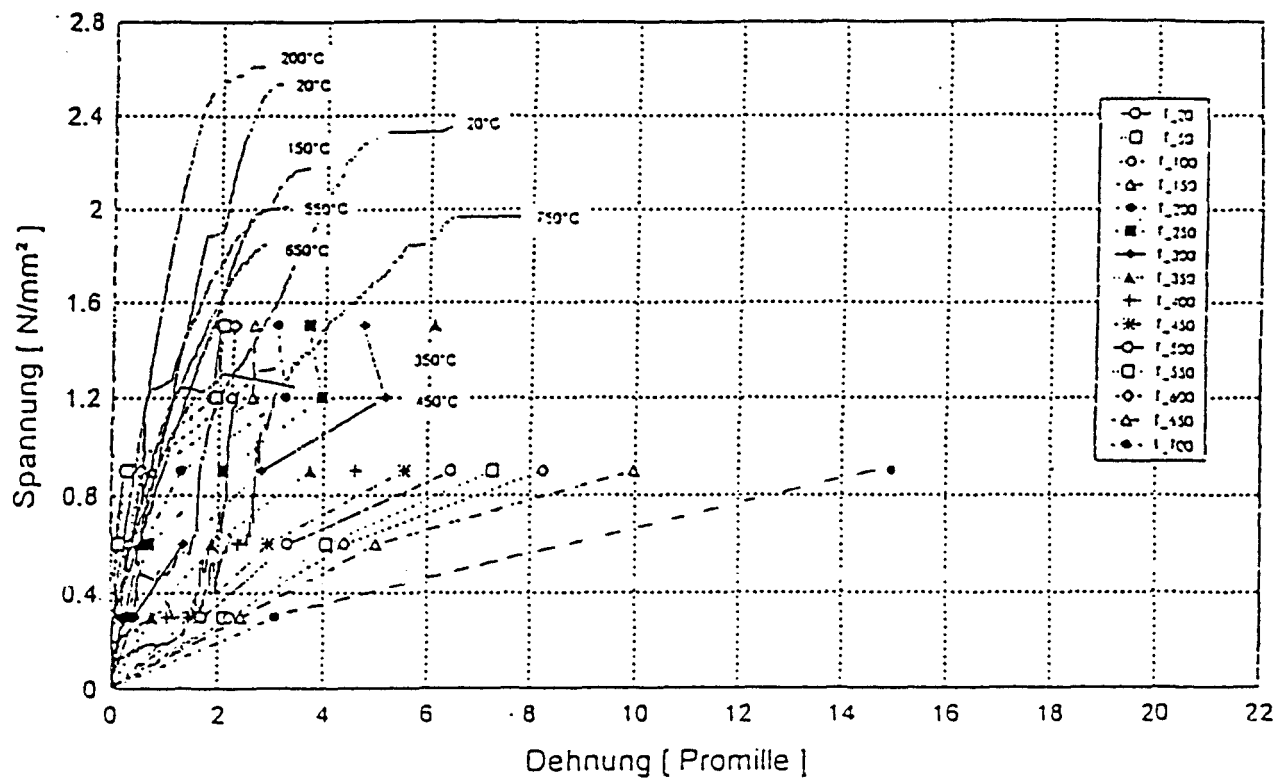


Bild 6.29: Vergleich  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche (---) / umgerechnete Warmkriechversuche (---•---) für Leichtbeton-Hohlblöcke

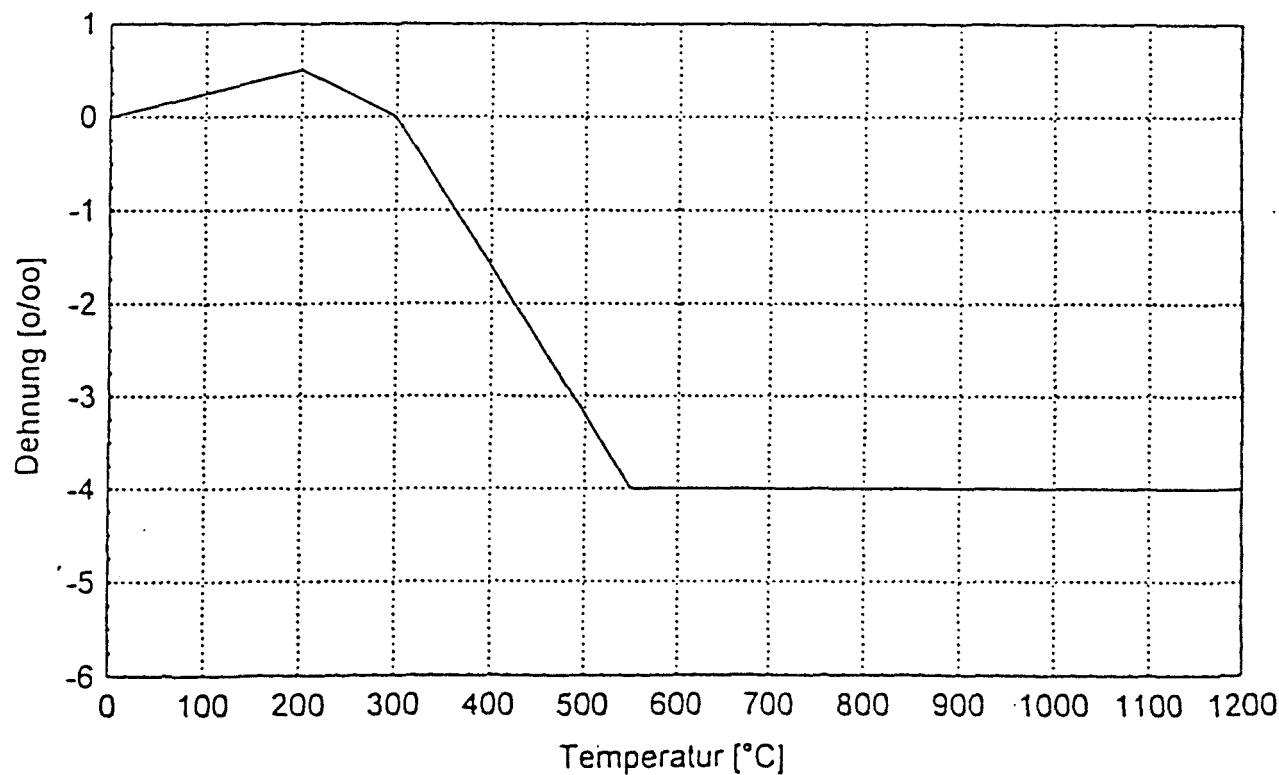


Bild 6.30: Rechenwerte der thermischen Dehnung für Leichtbeton

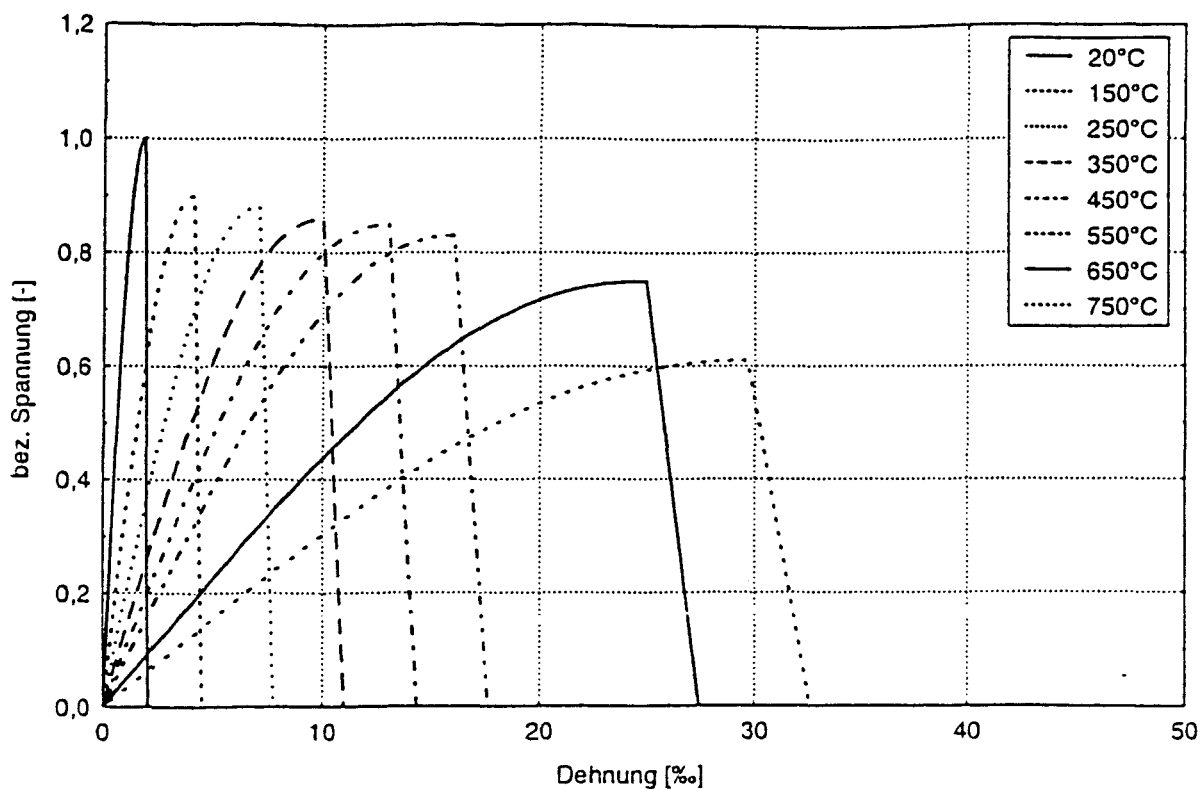


Bild 6.31: Rechenwerte für temperaturabhängige Spannungs-/Dehnungslinien für Leichtbeton-Mauerwerk aus Hohlblöcken

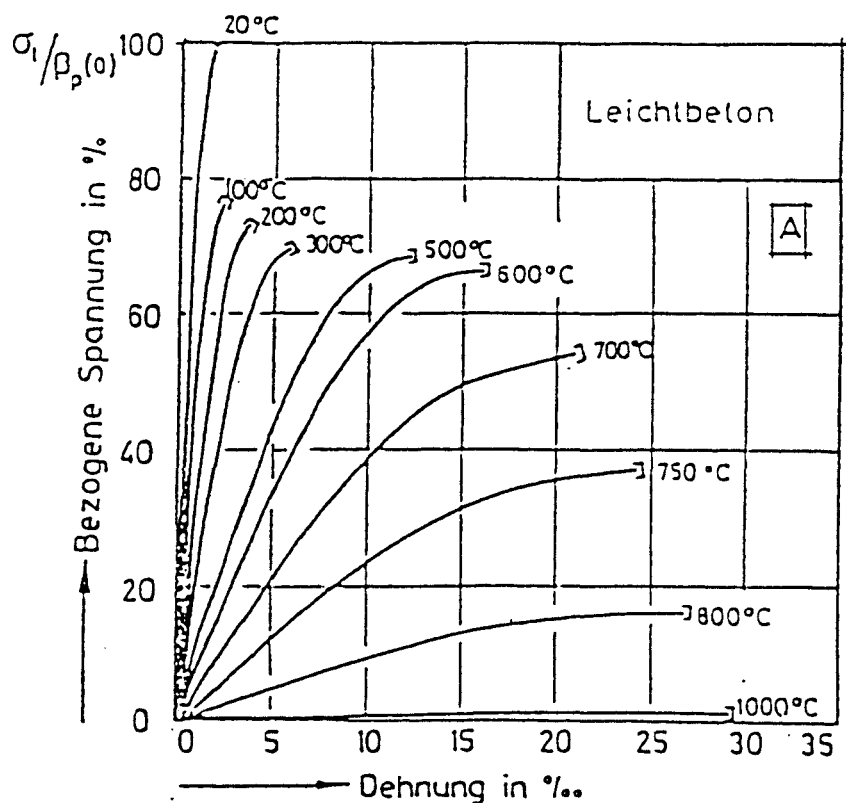


Bild 6.32: Rechenwerte für temperaturabhängige Spannungs-/Dehnungslinien für Leichtbeton nach [23]

### 6.2.3.5 Ziegel

Wie bereits erwähnt werden für Ziegel nur die Rechenwerte für temperaturabhängige Spannungs-/Dehnungslinien vorgestellt.

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Rechenwerten für Mauerwerk verlaufen die Kurven nicht entsprechend einem Parabelansatz, sondern für alle Temperaturen annähernd zusammen und linear, vgl. Bilder 6.34 und 6.36. Hierbei wurden jedoch nur die Werte der Lochprismen zugrundegelegt, weil, wie bereits erwähnt, aufgrund von Fertigungsproblemen die Werte der Vollprismen nicht vertrauenswürdig sind. Tendenziell verlaufen sie jedoch auch im wesentlichen linear. Die Festigkeitssteigerungen bei 650 °C und 750 °C wurden auf der Basis der bisher vorliegenden Werte vernachlässigt bzw. nicht positiv angesetzt.

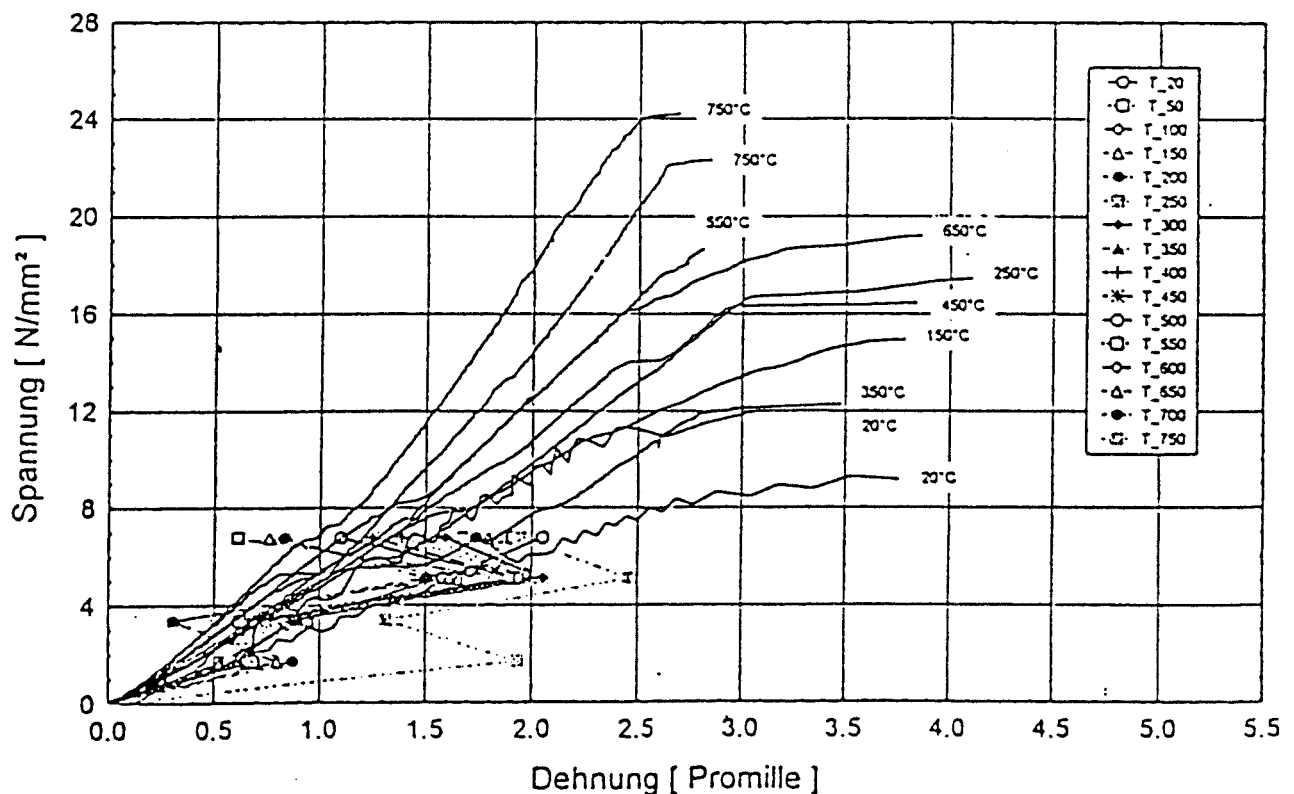


Bild 6.33: Vergleich  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche (---) / umgerechnete Warmkriechversuche (---•---) für Vollziegel-Prismen

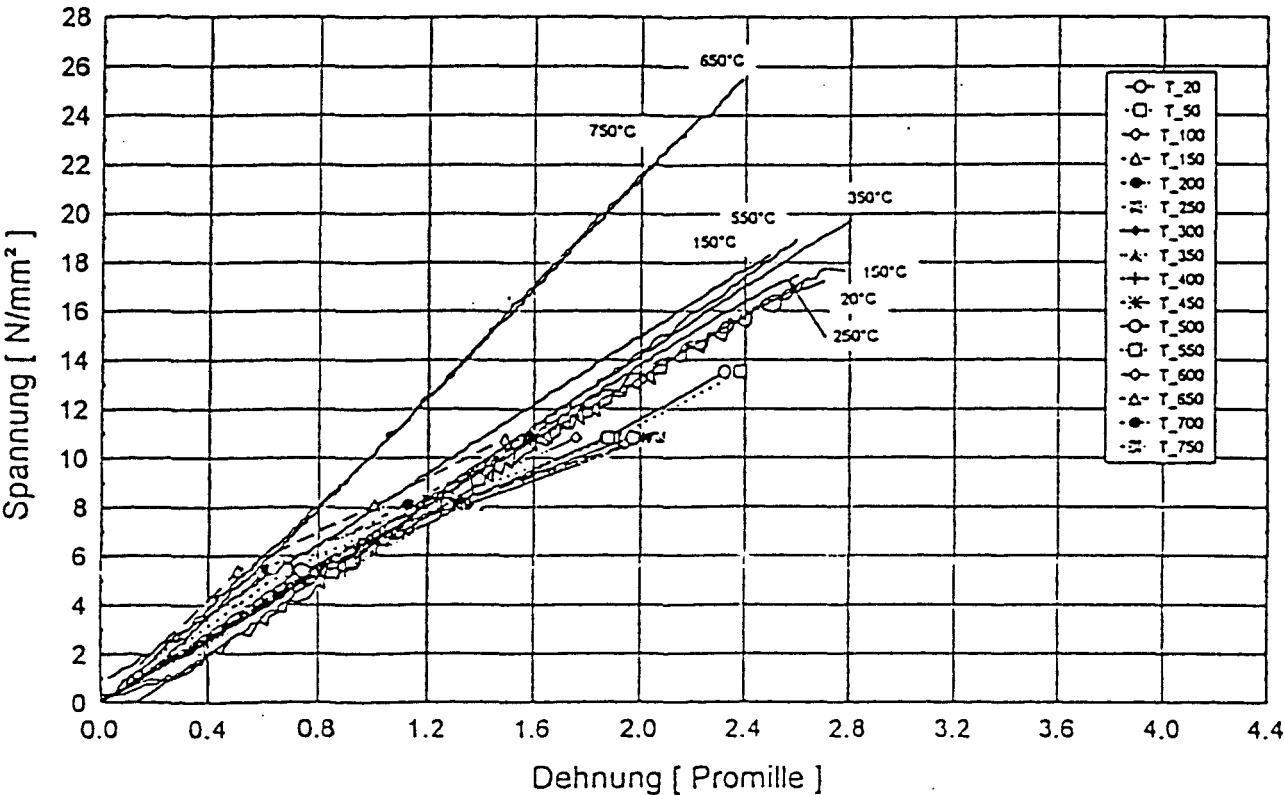


Bild 6.34: Vergleich  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche (---) / umgerechnete Warmkriechversuche (---•---) für Hochlochziegel

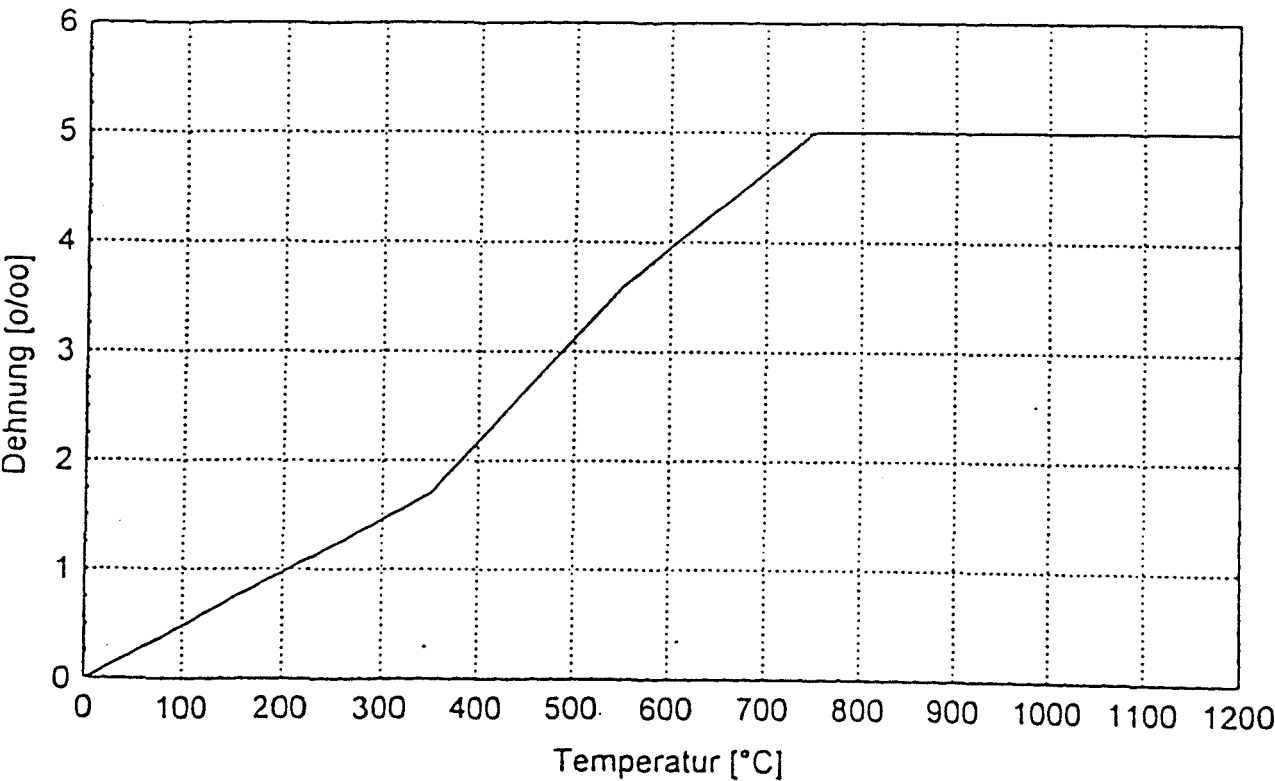


Bild 6.35: Rechenwerte der thermischen Dehnung für Ziegel

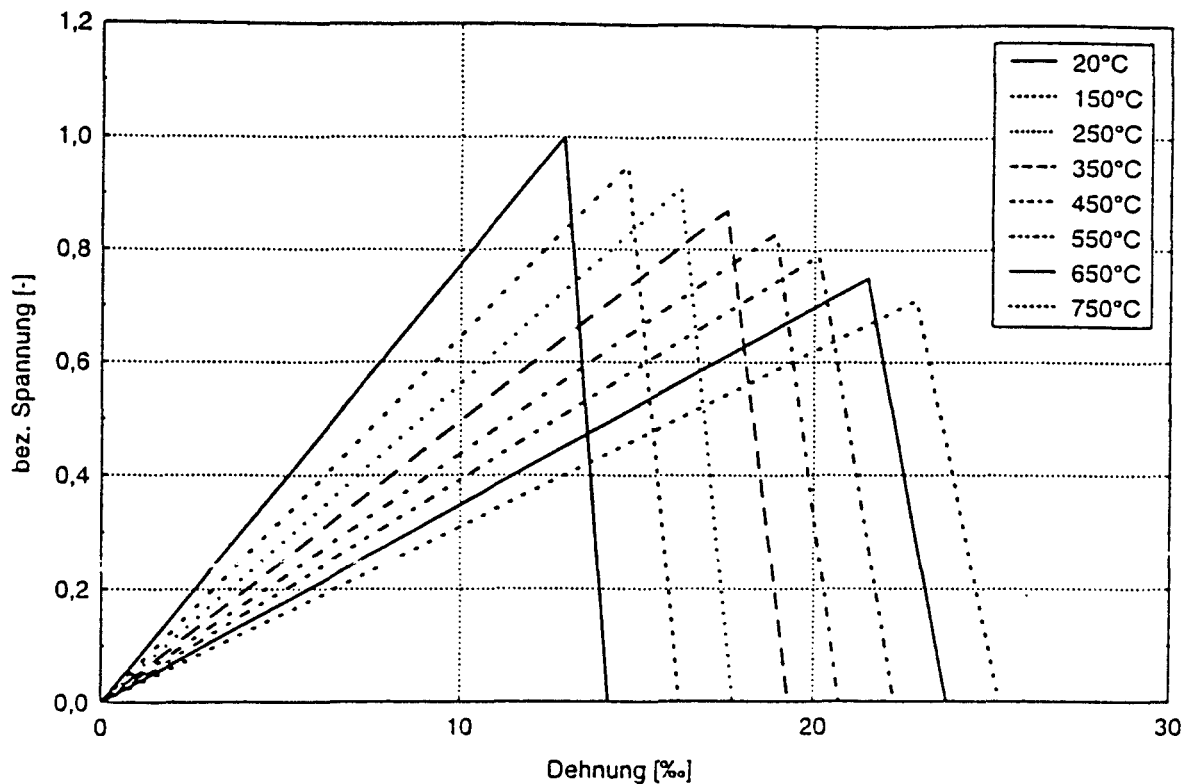


Bild 6.36: Rechenwerte für temperaturabhängige Spannungs-/Dehnungslinien für Ziegel

#### 6.2.3.6 Leichtmörtel

Nicht unerwähnt sollen die Rechenwerte für temperaturabhängige Spannungs-/Dehnungslinien für Leichtmörtel LM 21 und LM 36 bleiben. Sie unterscheiden sich deutlich. Der Leichtmörtel LM 21 weist einen deutlichen Festigkeitsabfall bei höheren Temperaturen auf. Die Festigkeit des Leichtmörtel LM 36 bleibt dagegen bei höheren Temperaturen nahezu unverändert.

Auch die Dehnungen unterscheiden sich deutlich. Der Leichtmörtel LM 21 erreicht nahezu die doppelte Dehnung gegenüber dem Leichtmörtel LM 36. Bei beiden Mörteln werden abweichend gegenüber den Mauersteinen auch geringe Zugfestigkeiten angesetzt, um das Tragverhalten von Mauerwerk angemessen zu berücksichtigen.

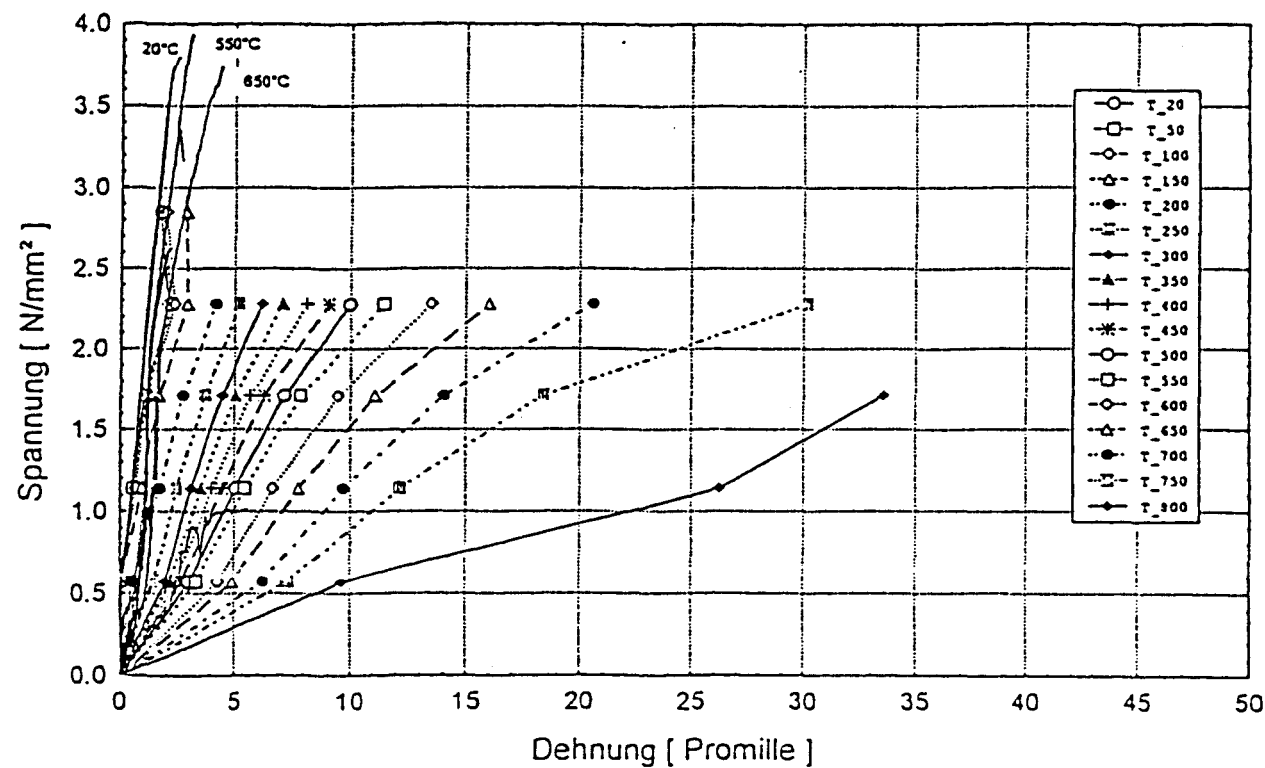


Bild 6.37: Vergleich  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche (---) / umgerechnete Warmkriechversuche (---•---) für Leichtmörtel LM 21

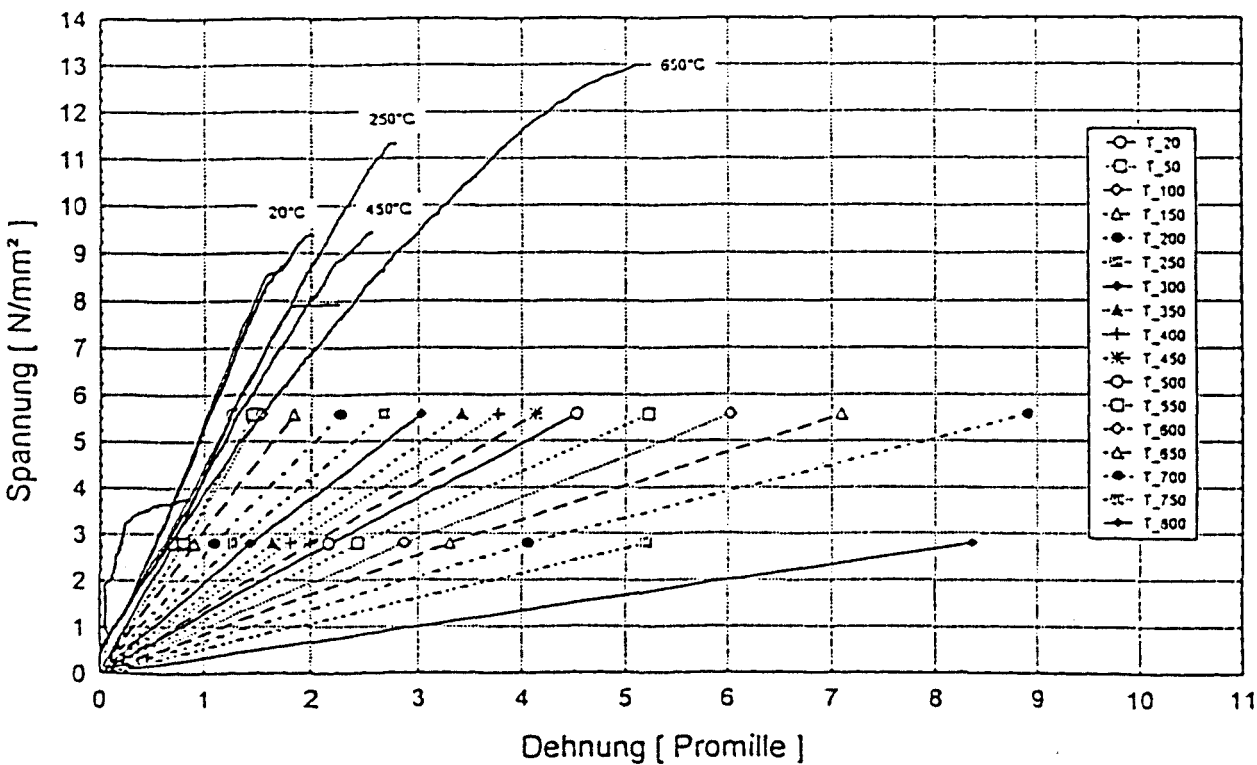


Bild 6.38: Vergleich  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuche (---) / umgerechnete Warmkriechversuche (---•---) für Leichtmörtel LM 36

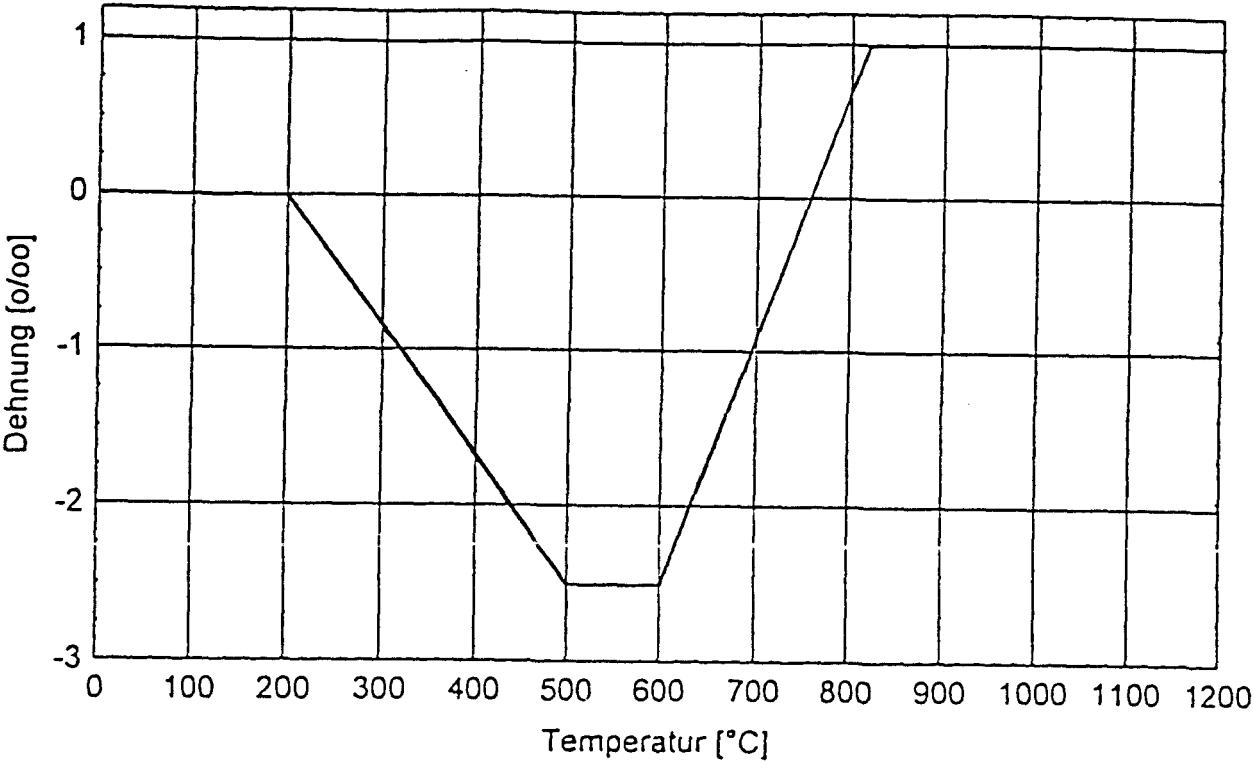


Bild 6.39: Rechenwerte der thermischen Dehnung für Leichtmörtel LM 21

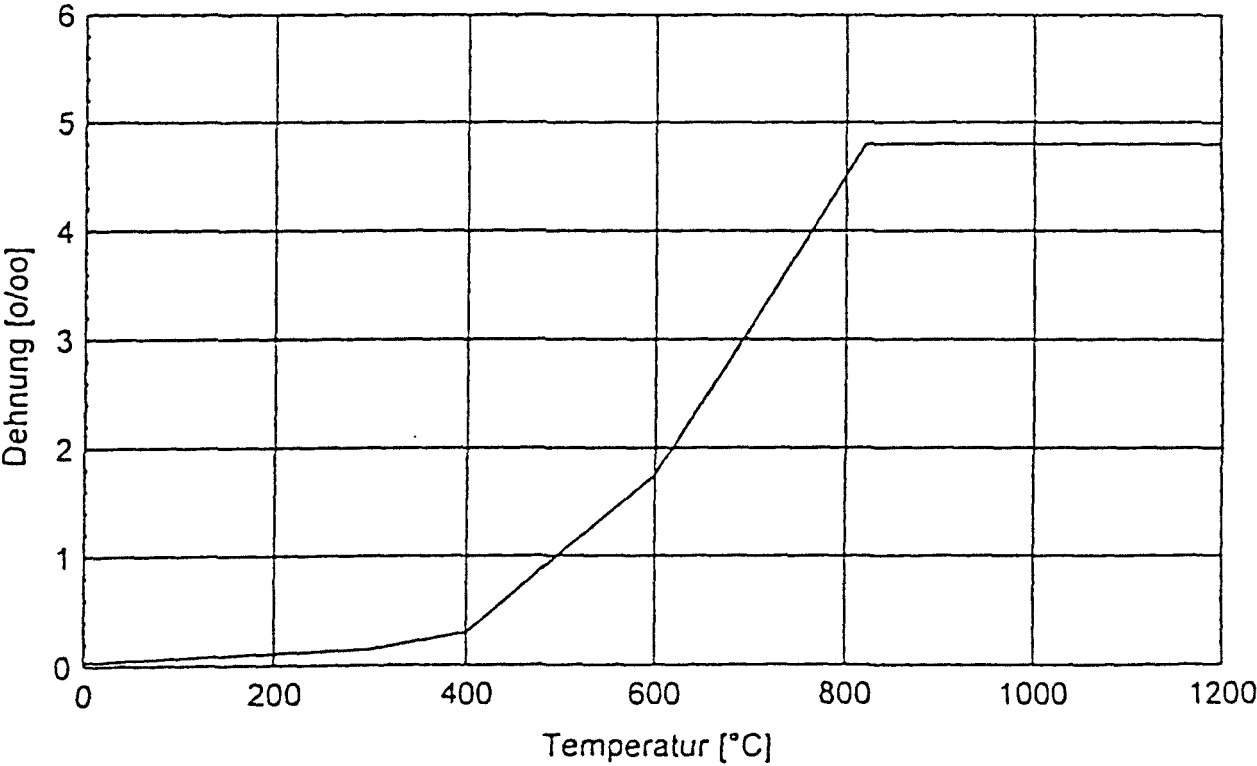


Bild 6.40: Rechenwerte der thermischen Dehnung für Leichtmörtel LM 36

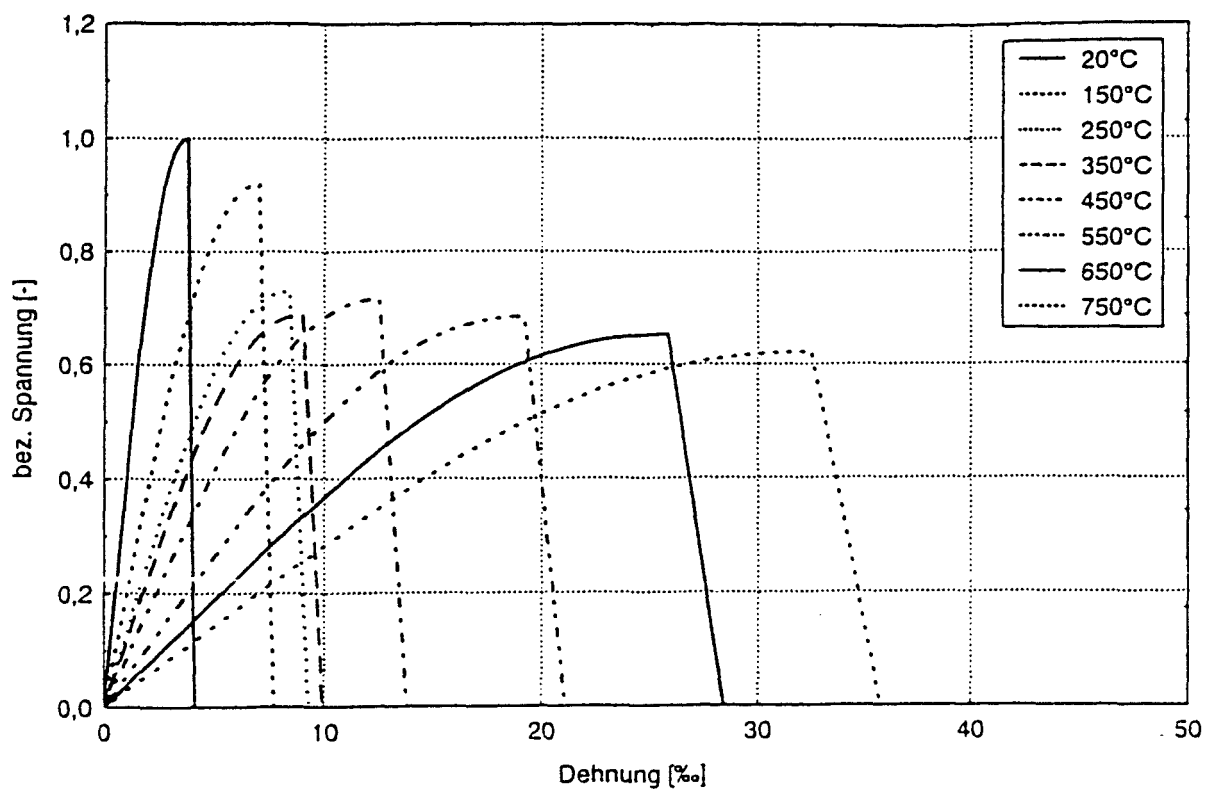


Bild 6.41: Rechenwerte für temperaturabhängige Spannungs-/Dehnungslinien für Leichtmörtel LM 21

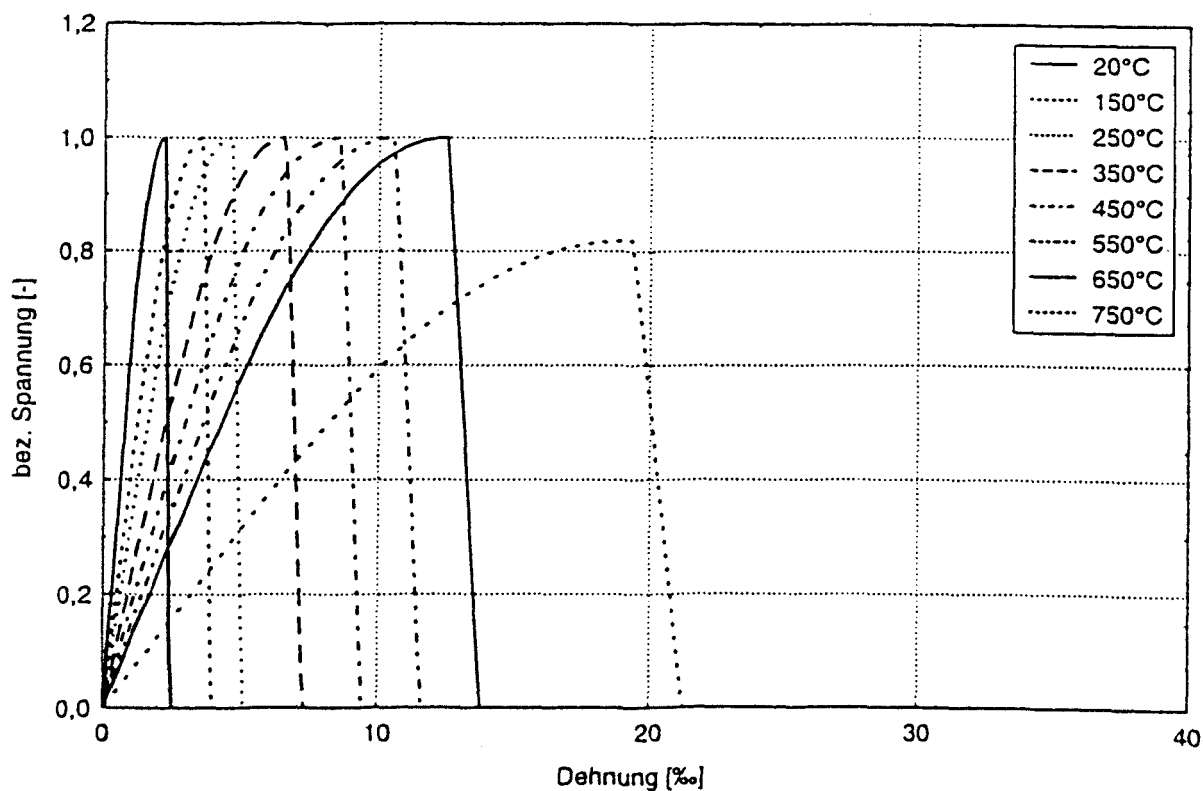


Bild 6.42: Rechenwerte für temperaturabhängige Spannungs-/Dehnungslinien für Leichtmörtel LM 36



#### 6.2.4 Verifizierung

Im Bild 6.43 werden berechnete und gemessene Versagenszeiten für Porenbetonwände gegenübergestellt.

Nur für Porenbetonwände, die mit Dünnbettmörtel vermauert waren, zeigte sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Für Kalksandstein-Mauerwerk, vermauert mit Normalmörtel, lagen nur zwei Prüfergebnisse zum Vergleich mit Rechenergebnissen vor, so daß eine generelle Aussage zur Übereinstimmung von Prüf- und Rechenergebnissen nicht möglich ist. Erste Rechenergebnisse deuten darauf hin, daß der große Einfluß, den Normalmörtel und Leichtmörtel das Tragverhalten von Mauerwerk bereits im "kalten" ausüben, bei Brandbeanspruchung noch vergrößert wird.

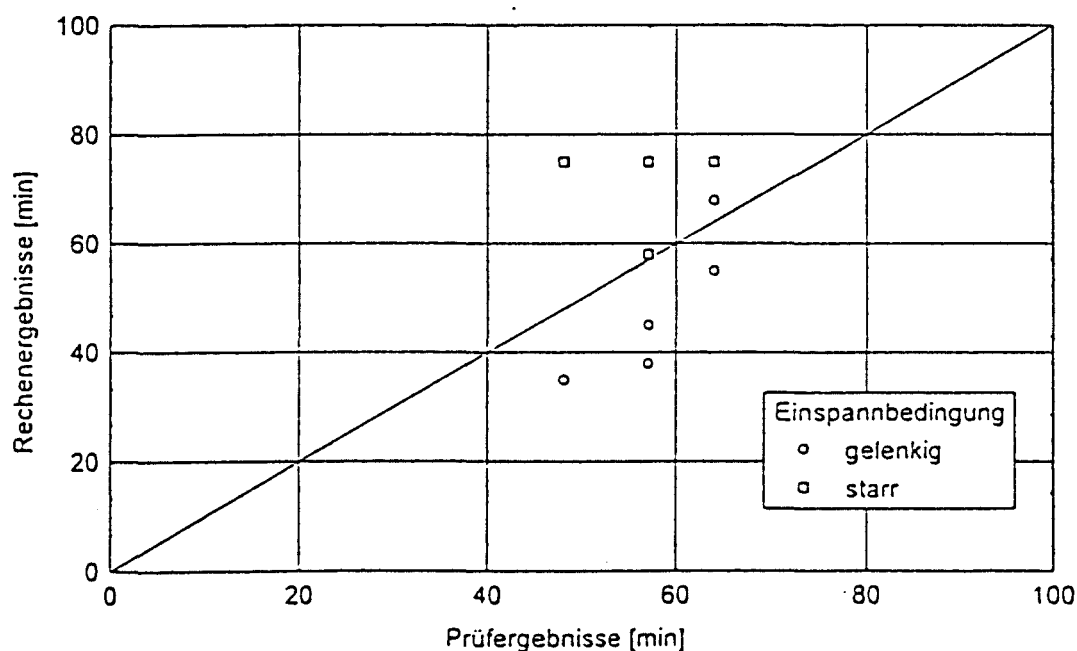


Bild 6.43: Vergleich gemessener und berechneter Versagenszeiten von Porenbetonwänden

#### 6.2.5 Offene Probleme

Die Entwicklung des allgemeinen Rechenverfahrens wurde auf der Basis des vorhandenen Programmpaketes STABA-F durch Einbindung temperaturabhängiger thermischer und mechanischer Materialgesetze von Mauerwerk durchgeführt. Die Rechenergebnisse - insbesondere die Versagenszeiten - wurden dann mit Prüfergebnissen von einigen typischen, ausgewählten Mauerwerksarten verglichen. Nachteilig war dabei die durchgehend schmale Datenbasis an Prüfergebnissen. Nur für Porenbetonwände lag ausreichend abgesichertes Datenmaterial für Vergleiche von Prüf- und Rechenergebnisse vor. Aus diesen Vergleichen ergeben sich eine Reihe offener Probleme, die in ähnlicher - teilweise schärferer - Form auch für andere Mauerwerksarten gelten.

Danach muß das allgemeine Rechenverfahren in der Lage sein, das mehraxiale Festigkeitsverhalten von brandbeanspruchten Mauerwerk zu erfassen, wobei die Materialbeschreibung unterschiedliche Rohstoffzusammensetzungen der Steinarten und Mörtelsorten berücksichtigen muß. Erforderlich sind u. a. Angaben über die temperaturabhängige Veränderung der Schubfestigkeit zwischen Mörtel und Stein. Die geometrische Querschnittskontur muß Lochbild und Lage der Fugen bei der thermischen und mechanischen Analyse wiedergeben.

## 7 VEREINFACHTES NACHWEISVERFAHREN FÜR DIE BEMESSUNG VON MAUERWERK UNTER HOCHTEMPERATURBEANSPRUCHUNG

### 7.1 Grundlagen

Im Zuge der europäischen Harmonisierung sollen in absehbarer Zeit rechnerische Nachweisverfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen - auch für Mauerwerk - bauaufsichtlich eingeführt werden. Für den Tragwerksplaner ohne detaillierte Brandschutzkenntnisse sind dabei vor allem vereinfachte Rechenverfahren von Interesse, da ihm allgemeine Rechenverfahren in Form von Computerprogrammen i. d. R. nicht zur Verfügung stehen. Die Grundlagen für brandschutztechnische Rechenverfahren wurden in den voranstehenden Abschnitten vorgestellt. Weitere Grundlagen sind im Eurocode 1 Teil 2-2 [N17] enthalten.

Das vereinfachte Rechenverfahren basiert auf diesen Grundlagen und wird durch Versuchsergebnisse und durch Vergleichsrechnungen nach dem in Abschnitt 6 vorgestellten allgemeinen Rechenverfahren abgesichert. Im folgenden wird die Entwicklung eines vereinfachten Rechenverfahrens vorgestellt.

Das Rechenverfahren ermöglicht, daß sowohl Wände mit einseitiger als auch Pfeiler mit mehrseitiger Brandbeanspruchung aus verschiedenen und teilweise sehr unterschiedlichen Mauerwerksarten hinsichtlich des Brandverhaltens, vgl. vorstehende Abschnitte, brandschutztechnisch bemessen werden können. Hierbei ist zwischen den einzelnen Mauerwerksarten - Porenbeton, Kalksandstein, Leichtbeton und Ziegel - zu unterscheiden, weil wie bereits mehrfach erwähnt, sich diese Mauerwerksarten im Brandfall teilweise sehr unterschiedlich verhalten.

## 7.2 Annahmen

Zur Entwicklung des vereinfachten Rechenverfahrens wurden analog zum Näherungsverfahren für Beton- und Verbundbauteile Ansätze mit sog. brandreduzierten Querschnitten untersucht.

Als Ausgangsbasis wurden Porenbeton-Pfeiler, vermauert mit Dünnbettmörtel, gewählt, anschließend wurden Porenbetonwände und dann weitere Mauerwerksarten untersucht. Als Voraussetzung wurden Lasteinleitungen, Auflagerbedingungen und Verformungsmöglichkeiten - Dehnungen und Verdrehungen - gemäß DIN 4102 Teil 2 zugrunde gelegt, vgl. Bild 7.1. Mit der Vereinbarung dieser Lasteinleitungen wird national die Meinung vertreten, daß damit praxisgerecht geprüft wird. Z. Zt. ist europäisch die gleiche Belastungsart, aufgrund der deutschen Vorgaben, vorgesehen.

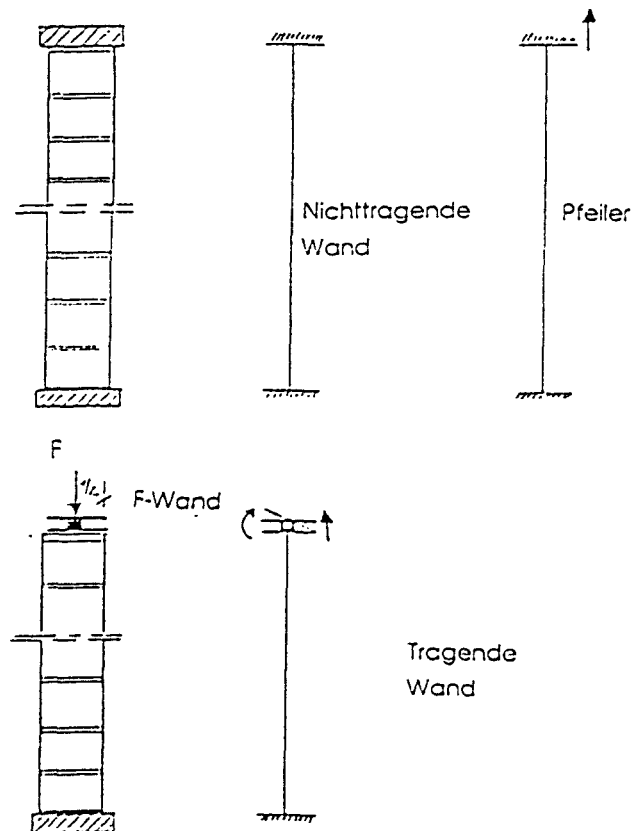


Bild 7.1: Lasteinleitungen und mögliche Verformungen ( $\epsilon$ ,  $\varphi$ ) aufgrund der Belastungseinrichtung bzw. Prüfrahmen bei Brandprüfungen von Mauerwerkswänden und -pfeilern

In Brandprüfungen werden Mauerwerkspfeiler grundsätzlich zentrisch belastet und oben und unten eingespannt.

Tragende Mauerwerkswände zum Nachweis der Feuerwiderstandsklassen F 30 - F 180 werden ebenfalls zentrisch belastet. Die Probekörper werden unten stumpf aufgemauert - eingespannt - und oben mit einem „quasi“ Gelenk versehen. Es handelt sich um kein ideales Gelenk, weil Vierkanteleisten und keine Rollen verwendet werden. Diese Lasteinleitung soll einen Wand-/Deckenanschluß simulieren.

Nichttragende Wände werden in einem Prüfrahmen errichtet, der Dehnungen behindert.

Probekörper zum Nachweis der Eignung als Brandwände werden exzentrisch belastet. Hierauf wird jedoch nicht weiter eingegangen, weil die erforderliche Stoßbeanspruchung für Brandwände bisher rechnerisch nicht berücksichtigt werden kann.

Für die „kalte“ Bemessung wird das vereinfachte Nachweisverfahren nach DIN 1053 Teil 1, Ausgabe 02/90, zugrundegelegt.

Im Prinzip wird dieses vereinfachte Nachweisverfahren auch für die „heiße“ Bemessung zugrundegelegt; es werden lediglich andere Festigkeitswerte für einzelne Querschnittsbereiche in Abhängigkeit von der jeweilig anzusetzenden Temperatur verwendet.

Im folgenden wird das Modell des vereinfachten rechnerischen Nachweisverfahrens anhand von ausgewählten Mauerwerkskonstruktionen vorgestellt und erläutert.

Ausgangsbasis für die Modellbildung waren im wesentlichen die zahlreichen vorliegenden Prüferfahrungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Mauerwerk bei Brandbeanspruchung.

### 7.3 Erläuterung des Verfahrens

#### 7.3.1 Allgemeines

Für das vereinfachte Rechenverfahren werden die Temperaturentwicklungen in den einzelnen Mauerwerksarten als Rechenwerte entweder in Form von Isothermen oder in graphischer Darstellung als Ausgangsbasis zugrunde gelegt und zur Verfügung gestellt. Diese Bilder (Werte) sind an Bauteilprüfungen kalibriert.

Als weiterer Grundwert werden für die einzelnen Mauerwerksarten sogenannte „Restquerschnitte“, für die jeweils für bestimmte Zeitpunkte (Klassifizierungszeiträume) „Abbrandraten“ festgelegt werden, bestimmt. Die Restquerschnitte werden in Abhängigkeit von der jeweiligen Temperatur in einige wenige, bestimmte Querschnittsbereiche unterteilt. Diesen Querschnittsbereichen werden wiederum bestimmte Festigkeiten zugeordnet. Anhand einer „kalten“ Bemessung wird die vorhandene Belastung unter Ausnutzung des Sicherheitsfaktors auf diese Querschnittsbereiche verteilt. Wenn sich ein Sicherheitsfaktor  $< 1,0$  ergibt, ist festzustellen, daß die Tragfähigkeit verloren ist und bei  $\geq 1,0$  ist die Tragfähigkeit gewährleistet.

Außerdem wird bei Pfeilern mit einer vierseitigen Brandbeanspruchung die Prüfpraxis vorausgesetzt, d.h. es wird eine zentrische Belastung mit einer ungewollten Ausmitte und ein Druckbruch als Tragfähigkeitsversagen vorausgesetzt.

Bei Wänden mit einer einseitigen Brandbeanspruchung wird ebenfalls eine zentrische Belastung mit einer ungewollten Ausmitte vorausgesetzt, jedoch wird zusätzlich die Verformung aufgrund der einseitigen thermischen Beanspruchung und das „quasi“ Gelenk entweder bis zur klaffen Fuge oder bis zum maximal möglichen Deckendrehwinkel aufgrund der Prüfanordnung berücksichtigt. Die Prüfanordnung (Auflagerbedingungen) wird

jeweils deswegen berücksichtigt, weil sie maßgebend war für alle bisherigen Klassifizierungen nach DIN 4102.

Der vereinfachte Rechennachweis wurde mit Hilfe von Porenbeton-Mauerwerk entwickelt und kalibriert, weil Porenbeton ein homogener Baustoff ist und bei Wänden relativ vergleichbare Prüfergebnisse vorliegen. Bei Pfeilern streuen die Prüfergebnisse erheblich. Im Rahmen der Normprüfungen wurden daher Klassifizierungen auf der sicheren Seite liegend ausgesprochen. Der vereinfachte Rechennachweis wurde daher als erster Schritt anhand dieser Klassifizierungen kalibriert.

Die Modellbildung des vereinfachten rechnerischen Nachweisverfahrens wird zunächst allgemein erläutert. In die Modellbildung fließen auch zahlreiche Erkenntnisse aus Bauteilprüfungen ein. Danach werden für einzelne Mauerwerksarten spezifischen Kennwerte vorgestellt. Weitergehende Angaben können [27] entnommen werden.

Für das vereinfachte Rechenverfahren wurden die Gleichungen 12 für Pfeiler sowie 13 und 14 für Wände entwickelt.

Pfeiler:

$$\begin{aligned} F_{fi(t)} &= [k \cdot (\sigma_{o(t1)} \cdot A_{(t1)} + \sigma_{o(t2)} \cdot A_{(t2)})] \cdot \gamma \\ &> F_{vorh.} \end{aligned} \quad (12)$$

mit

$$\begin{aligned} \sigma_{zul} &= k \cdot \sigma_o \\ \sigma_{vorh} &= \frac{F}{A} \\ \sigma_{o(t1)} &= \sigma_{o(20^\circ C)} \\ \sigma_{o(t2)} &= c \cdot \sigma_{o(20^\circ C)} \\ A_{(t1)} &= A_{ges} - A_{abbr} - A_{(t1-t2)} \\ A_{(t2)} &= A_{ges} - A_{abbr} - A_{(20^\circ C-t1)} \end{aligned}$$

- $C$  = Konstante für Mauerwerk in Abhängigkeit vom Stein und Mörtel, s.a. auch [27]  
 $A_{ges}$  = Gesamtfläche des Pfeilers  
 $A_{abbr}$  = Abbrandfläche des Pfeilers  
 $A_{(20^{\circ}C-t_1)}$  = Fläche zwischen den Isothermen Ausgangstemperatur ( $20^{\circ}C$ ) bis  $t_1$  in  $^{\circ}C$   
 $A_{(t_1-t_2)}$  = Fläche zwischen den Isothermen  $t_1$  in  $^{\circ}C$  bis  $t_2$  in  $^{\circ}C$   
 $k$  nach DIN 1053  
 $\gamma$  nach DIN 1053  
 $f_i$  = Bemessungswert unter Brandbeanspruchung  
 $\sigma_o(20^{\circ}C)$  = Grundwert der zulässigen Druckspannung nach DIN 1053-1

Wände:

Tragfähigkeit

$$F_{fi(t)} = (F_{fi(t_1)} + F_{fi(t_2)}) \cdot \gamma > F_{vorh} \quad (13)$$

mit

$$\begin{aligned}
 \sigma_{zul} &= k \cdot \sigma_o \\
 \sigma_{vorh} &= \frac{F}{A} \pm \frac{M}{W} \\
 M &= F \cdot e \\
 W &= (b \cdot d^2) / 6
 \end{aligned}$$

$$\sigma_{fi(t)} = k \cdot \sigma_o(t)$$

$$F_{fi(t_1)} = \frac{\sigma_{fi(t_1)}}{\frac{1}{A_{(t_1)}} \pm \frac{e_1 \cdot 6}{b \cdot d_0^2}}$$

$$F_{fi(t_2)} = \frac{\sigma_{fi(t_2)}}{\frac{1}{A_{(t_2)}} \pm \frac{e_2 \cdot 6}{b \cdot d_0^2}}$$



$$\begin{aligned}\sigma_o(t_1) &= \sigma_o(20^\circ\text{C}) \\ \sigma_o(t_2) &= C \cdot \sigma_o(20^\circ\text{C}) \\ A_{(t_1)} &= A_{\text{ges}} - A_{\text{abbr}} - A_{(t_1 - t_2)} \\ A_{(t_2)} &= A_{\text{ges}} - A_{\text{abbr}} - A_{(20^\circ\text{C} - t_1)}\end{aligned}$$

$C$  = Konstante für Mauerwerk in Abhängigkeit vom Stein und Mörtel, s.a [27]  
 $A_{\text{ges}}$  = Gesamtfläche der Wand  
 $A_{\text{abbr}}$  = Abbrandfläche bezogen auf die Wanddicke  
 $A_{(20^\circ\text{C} - t_1)}$  = Fläche zwischen den Isothermen Ausgangstemperatur ( $20^\circ\text{C}$ ) bis  $t_1$  in  $[\text{°C}]$   
 $A_{(t_1 - t_2)}$  = Fläche zwischen den Isothermen  $> t_1$  in  $[\text{°C}]$  bis  $t_2$  in  $[\text{°C}]$   
 $e$  = ungewollte Ausmitte  
 $k$  nach DIN 1053  
 $\gamma$  nach DIN 1053  
 $f_i$  = Bemessungswert unter Brandbeanspruchung  
 $\sigma_o(20^\circ\text{C})$  = Grundwert der zulässigen Druckspannung nach DIN 1053-1

und

Knicken

$$f_{(t)} = f \pm f_{fi(t)} > f_{zul} \quad (14)$$

mit

$$f_{fi(t)} = \frac{M_{fi(t)} \cdot h_k^2}{27 \cdot EI}$$

$$M_{fi(t)} = N \cdot e_{fi(t)}$$

$$f = f_i = \lambda \cdot \frac{1 + m}{1800} \cdot h_k$$

$$E = 400 \cdot \beta_R$$

### 7.3.2 Porenbeton

Porenbeton hat bei Brandbeanspruchung die Eigenschaft, daß der äußere Randbereich schnell relativ stark schrumpft und zermürbt und daher nicht mehr tragfähig ist. Mit zusätzlichen stichprobenartigen Kleinversuchen wurde festgestellt, wie tief diese Zermürbung nach einer Brandbeanspruchung mit der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) zu bestimmten Zeiten - 30 min, 60 min, 90 min - war. Es konnte festgestellt werden, daß jeweils etwa die 400 °C Linie die Grenze darstellte. Für die Berechnung werden daher alle Flächen oberhalb der 400 °C - Linie als nicht anzusetzende Abbrandflächen angesetzt. Der Restquerschnitt wird nochmals unterteilt und zwar werden, vereinfacht angenommen, alle Flächen von Raumtemperatur bis 200 °C und alle Flächen > 200 °C bis < 400 °C jeweils zu einer Fläche zusammengefaßt. Der Fläche bis 200 °C wird die Festigkeit bei Raumtemperatur zugeordnet und der Fläche von 200 °C bis 400 °C wird eine Festigkeit mit Kalibrierfaktor  $c_{pb}$  zugewiesen. Unter Ausnutzung des Sicherheitsfaktors  $\gamma$  wird damit die Tragfähigkeit ermittelt.

Im folgenden Bild 7.2 sind die anzusetzenden Temperaturen in Abhängigkeit von der Bauteildicke und der Zeit dargestellt. Für die Temperaturbeanspruchung wird grundsätzlich die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) nach DIN 4102 Teil 2 zugrunde gelegt.

Aus dem Bild 7.2 ist deutlich erkennbar, wie gering die Wärmeleitung von Porenbeton ist und wie langsam die Temperaturen eindringen.

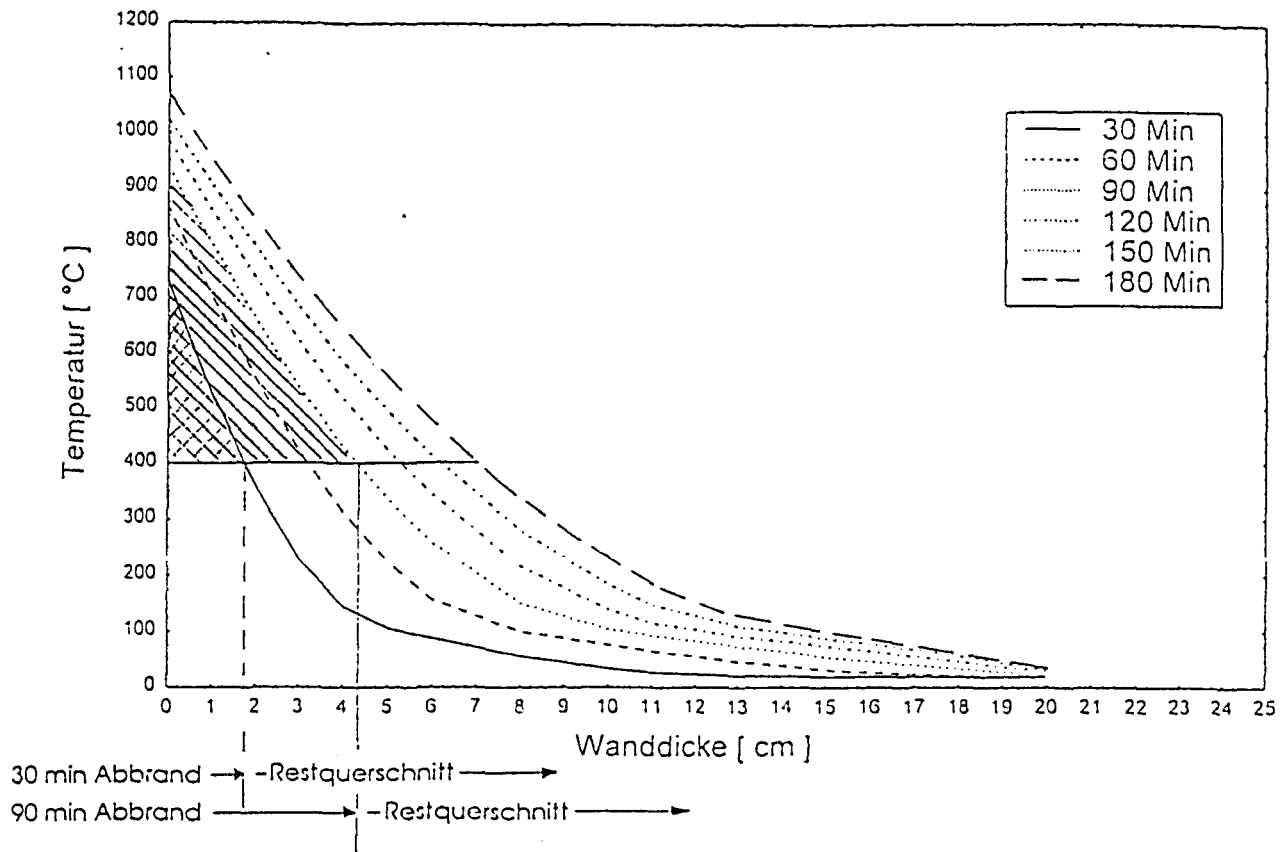


Bild 7.2: Temperaturverteilung (Rechenwerte) in Porenbeton in Abhängigkeit von der Bauteildicke und der Zeit sowie anzusetzende Abbrandrate

In der folgenden Tabelle 7.1 sind beispielhaft einige Rechenergebnisse zusammengefaßt und den Prüfergebnissen gegenüber gestellt. Die Berechnung erfolgte nach den Gleichungen [12] für Pfeiler mit zentrischer Belastung und nach [13], [14] für Wände unter Berücksichtigung einer ungewollten Ausmitte.

Die errechneten Versagenszeiten sollen gegenüber den Prüfergebnissen auf der sicheren Seite liegen, was für das vereinfachte Rechenverfahren als Voraussetzung zugrunde gelegt wurde. Bei den vorliegenden, erheblichen streuenden Prüfergebnissen konnte diese Randbedingung nicht immer erfüllt werden. Im Bild 7.7 werden die Rechenergebnisse Prüfergebnissen gegenübergestellt.

Bauteil	Abmessungen d x b x h	Brand- bean- spru- chung	Auf- last	Aus- nut- zungs- faktor	Versa- gens- zeit im Ver- such <sup>1)</sup>	vereinfachte Berechnung	
						Zeit	auf- nehm- bare Last
	[cm]		[kN] [kN/m] <sup>2)</sup>	$\alpha$	[min]	[min]	[kN] [kN/m] <sup>2)</sup>
Pfeiler PP2 -DB	17,5 x 50 x 275	vier- seitig	37,0	1,0	96	90	33,3
Pfeiler PP2 -DB	20 x 50 x 275	vier- seitig	40,0	1,0	75	90 120	40,3 31,4
Pfeiler PP2 -DB	24 x 50 x 275	vier- seitig	50,3	1,0	81	90 120 150	63,2 51,9 43,3
Pfeiler PP2 -DB	17,5 x 50 x 275	vier- seitig	22,2	0,6	>180 <sup>3)</sup>	120 150	24,4 17,7
Wand PP2 -DB	11,5 x 100 x 300	ein- seitig	23,0	1,0	57	30 60	38,6 28,2
Wand PP2 -DB	11,5 x 100 x 300	ein- seitig	13,8	0,6	64	60 90	38,6 28,2
Wand PP4 -DB	11,5 x 100 x 300	ein- seitig	41,4	1,0	48	30 60	61,6 44,3
Wand PP4 -DB	11,5 x 100 x 300	ein- seitig	25,3	0,6	57	30 60	61,6 44,3
Wand PP2 -DB	17,5 x 100 x 300	ein- seitig	117	1,0	64	60	115,9
Wand PP2 -DB	17,5 x 100 x 300	ein- seitig	70	0,6	=180	180	106,8
Wand PP2 -DB	20 x 100 x 300	ein- seitig	80	0,6	>180 <sup>3)</sup>	180	120,5

<sup>1)</sup> Pfeiler beidseitig eingespannt, Wände einseitig gelenkig, einseitig eingespannt, vgl. Bild 7.1

<sup>2)</sup> bei Pfeilern [kN], bei Wänden [kN/m]

<sup>3)</sup> Brandprüfung abgebrochen bei 180 Minuten

Tabelle 7.1: Rechenergebnisse für Porenbeton unter Anwendung des vereinfachten Rechenverfahrens und den zugrundegelegten Festigkeiten in Abhängigkeit vom Restquerschnitt (Beispiele)

Die Rechenergebnisse wurden unter Zugrundelegung von Bild 7.2 und den Gleichungen 12 bis 14 unter folgenden Annahmen ermittelt:

$C = C_{pb}$   
 $= 1,1$  = Konstante für Porenbeton-Mauerwerk PP 2  
 und Dünnbettmörtel, s.a. [27]

$A_{(20^{\circ}\text{C}-t_1)}$  = Fläche zwischen den Isothermen  
 Ausgangstemperatur ( $20^{\circ}\text{C}$ ) bis  $200^{\circ}\text{C}$

$A_{(t_1-t_2)}$  = Fläche zwischen den Isothermen  
 $> 200^{\circ}\text{C}$  bis  $400^{\circ}\text{C}$

Im Bild 7.3 werden Rechenergebnisse aus dem allgemeinen Verfahren den vereinfachten Verfahren gegenübergestellt. Die  $400^{\circ}\text{C}$  - Grenze für den Abbrandbereich wird bestätigt und außerdem wird deutlich, daß das vereinfachte Verfahren gegenüber dem allgemeinen Verfahren auf der sicheren Seite liegt.

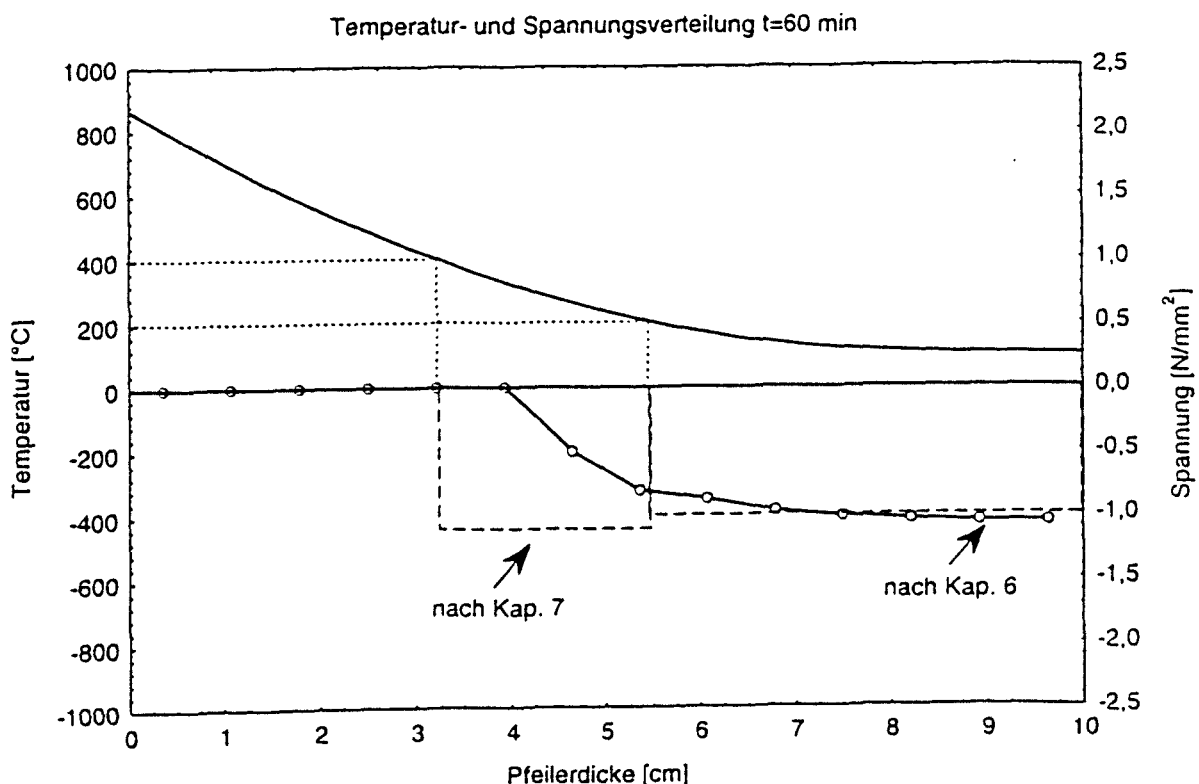


Bild 7.3.1 Temperaturverteilung und Spannungsverteilung in einem (Viertel-)Pfeilerquerschnitt aus Porenbeton nach Abschnitt 6 und aufnehmbare Spannungen nach Gl. (12), Zeitpunkt  $t=60$  min

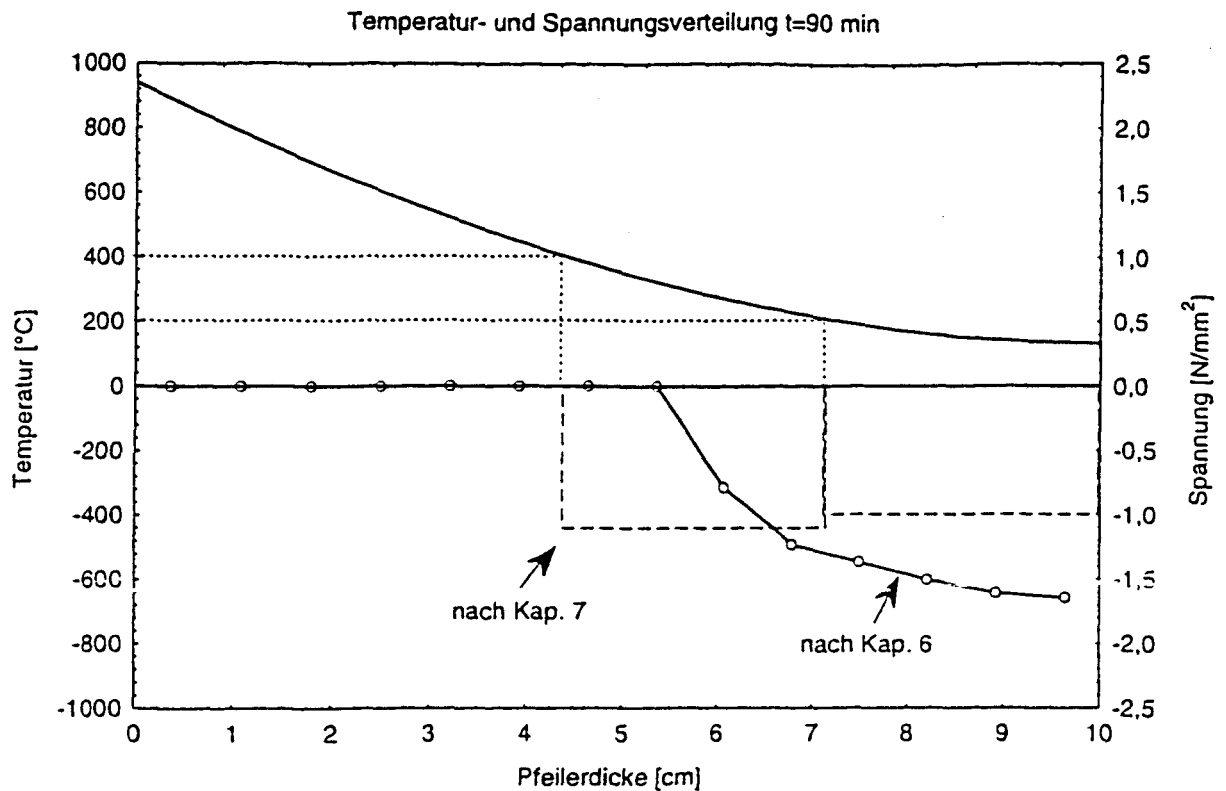


Bild 7.3.2 Temperaturverteilung und Spannungsverteilung in einem (Viertel-)Pfeilerquerschnitt aus Porenbeton nach Abschnitt 6 und aufnehmbare Spannungen nach Gl. (12), Zeitpunkt  $t=90$  min

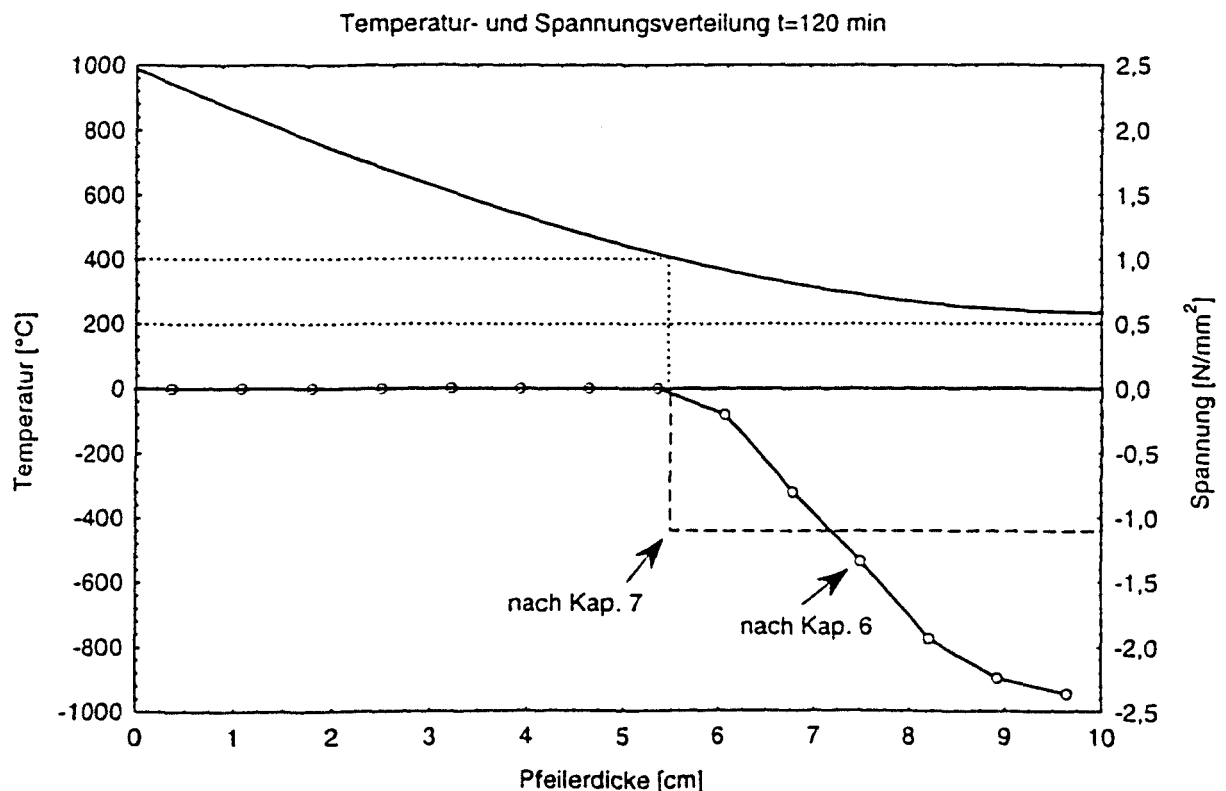


Bild 7.3.3 Temperaturverteilung und Spannungsverteilung in einem (Viertel-)Pfeilerquerschnitt aus Porenbeton nach Abschnitt 6 und aufnehmbare Spannungen nach Gl. (12), Zeitpunkt  $t=120$  min

### 7.3.3 Kalksandstein

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Modellbildung für Porenbeton konnte entsprechend den vorstehenden Angaben auch für Kalksandstein das vereinfachte Rechenverfahren eingesetzt werden. Lediglich die Grenzen der anzusetzenden Randbedingungen waren entsprechend zu modifizieren. Außerdem wurden die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Mörtelarten berücksichtigt.

Für die Temperaturen und die Abbrandraten ist das Bild 7.4 zugrunde zu legen.

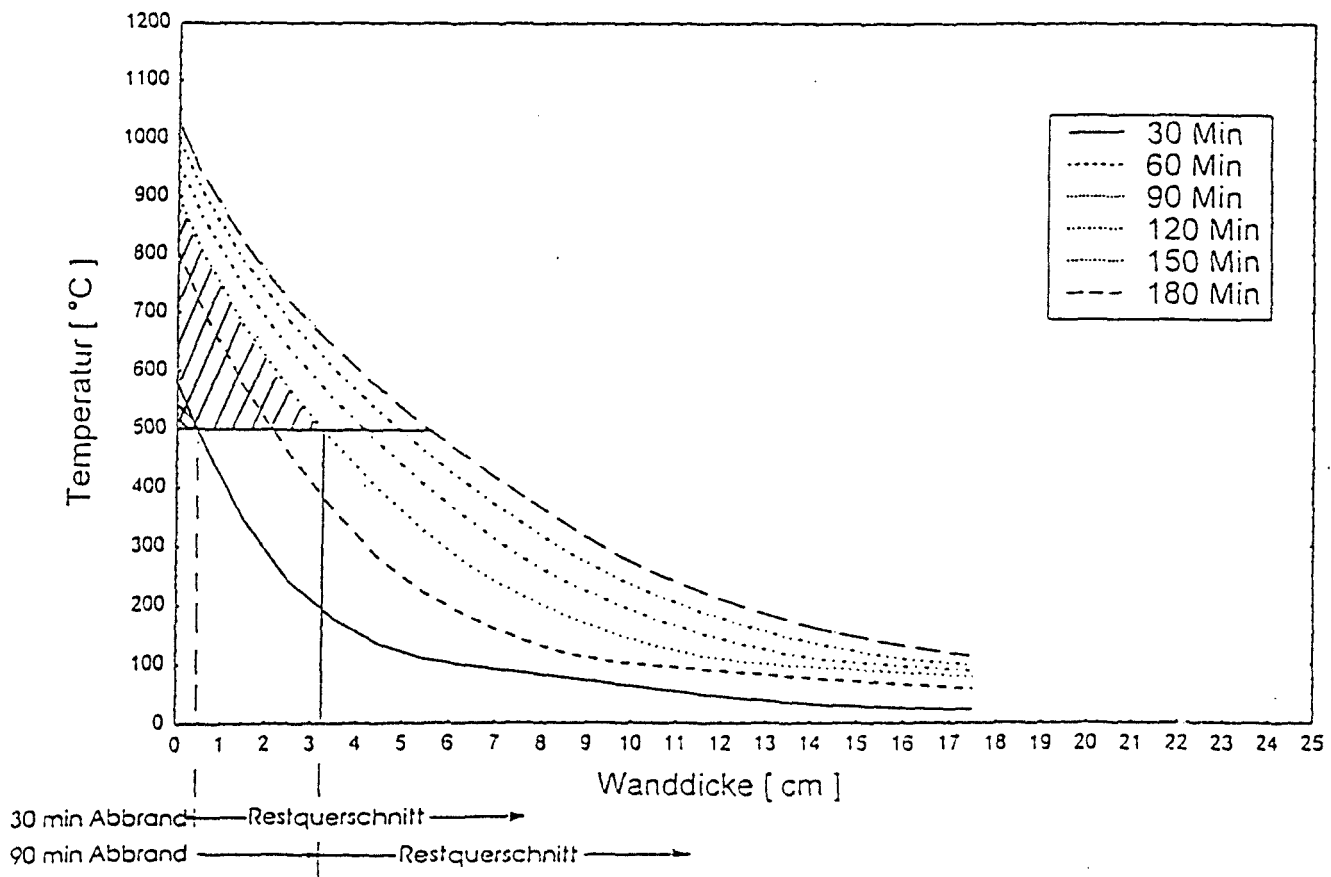


Bild 7.4: Temperaturverteilung (Rechenwerte) in Kalksandstein in Abhängigkeit von der Bauteildicke und der Zeit sowie anzusetzende Abbrandrate

In den Formeln (12 bis 14) werden abweichend von Abschnitt 7.3.1 folgende Werte eingesetzt:

Pfeiler (12) mit

siehe auch Abschnitt 7.3.2

$$A_{(t_1)} = A_{ges} - A_{abbr} - A_{(t_1 - t_2)}$$

$$A_{(t_2)} = A_{ges} - A_{abbr} - A_{(20^\circ C - t_1)}$$

$$C = C_{KS}$$

$$= 0,8 = \text{Konstante für Kalksandstein - Mauerwerk} \\ \text{KSPE 20 mit Dünnbettmörtel}$$

$$= 0,6 = \text{Konstante für Kalksandstein-Mauerwerk} \\ \text{KS 28 bzw. 48 mit Normalmörtel IIIa,} \\ \text{s.a. [27]}$$

$$A_{ges} = \text{Gesamtfläche des Pfeilers}$$

$$A_{abbr} = \text{Abbrandfläche des Pfeilers}$$

$$A_{(20^\circ C - t_1)} = \text{Fläche zwischen den Isothermen} \\ \text{Ausgangstemperatur (20°C) bis 100°C}$$

$$A_{(t_1 - t_2)} = \text{Fläche zwischen den Isothermen} \\ > 100^\circ C \text{ bis } 500^\circ C$$

Wände (13) und (14)

siehe oben und auch Abschnitt 7.3.2

$$A_{ges} = \text{Gesamtfläche der Wand}$$

$$A_{abbr} = \text{Abbrandfläche bezogen auf die Wanddicke}$$



Bauteil	Abmessungen d x b x h	Brand- bean- spru- chung	Auf- last	Aus- nut- zungs- faktor	Ver- sa- gens- zeit im Ver- such <sup>1)</sup>	vereinfachte Berechnung	
						Zeit	auf- nehm- bare Last
	[cm]		[kN] [kN/m] <sup>2)</sup>	$\alpha$	[min]	[min]	[kN] [kN/m] <sup>2)</sup>
Pfeiler KS 28-NM IIIa	24x24x237,5	vier- seitig	176	1,1	88	60 90	195,1 152,6
Pfeiler KS 28-NM IIIa	24x24x275	vier- seitig	158	1,0	- <sup>3)</sup>	60 90	195,1 152,6
Pfeiler KSPE 20-DB	15x24x275	vier- seitig	63	1,0	- <sup>3)</sup>	60 90	84,2 61,0
Pfeiler KSPE 20-DB	15x24x275	vier- seitig	22	0,35	> 121	90 120	61,0 42,9
Pfeiler KSPE 20-DB	15x30x275	vier- seitig	27	0,35	> 121	90 120	82,0 59,6
Pfeiler KSPE 20-DB	15x36,5x275	vier- seitig	34	0,35	153	120 180	77,5 42,6
Wand KSPE 20-DB	17,5x100x300	ein- seitig	264 (410) <sup>5)</sup>	1,0 1,0	BW <sup>4)</sup> - <sup>3)</sup>	 180	 601
Wand KS 48-NM IIIa	11,5x100x300	ein- seitig	103 187	0,55 1,0	135 <sup>5)</sup> - <sup>3)</sup>	 120	 296,3

<sup>1)</sup> Pfeiler beidseitig eingespannt, Wände einseitig gelenkig, einseitig eingespannt, vgl. Bild 7.1

<sup>2)</sup> bei Pfeiler [kN], bei Wänden [kN/m]

3) Brandprüfung nicht durchgeführt,

4) BW = Brandwand

5) Temperaturkriterium i.M. 140 K

<sup>51)</sup> bei zentrischer Belastung

Tabelle 7.2: Rechenergebnisse für Kalksandstein unter Anwendung des vereinfachten Rechenverfahrens und den zugrundegelegten Festigkeiten in Abhängigkeit vom Restquerschnitt (Beispiele)

Weitere Ergebnisse werden in [27] zusammengefaßt.

#### 7.3.4 Leichtbeton aus Bims

Ebenso konnte aufbauend auf den Erkenntnissen der Modellbildung für Porenbeton entsprechend den vorstehenden Angaben auch für Leichtbeton-Mauerwerk mit Zuschlägen aus Bims das vereinfachte Rechenverfahren eingesetzt werden. Lediglich die Grenzen der anzusetzenden Randbedingungen waren entsprechend zu modifizieren.

Für die Temperaturen und die Abbrandraten ist das Bild 7.5 zugrunde zulegen.

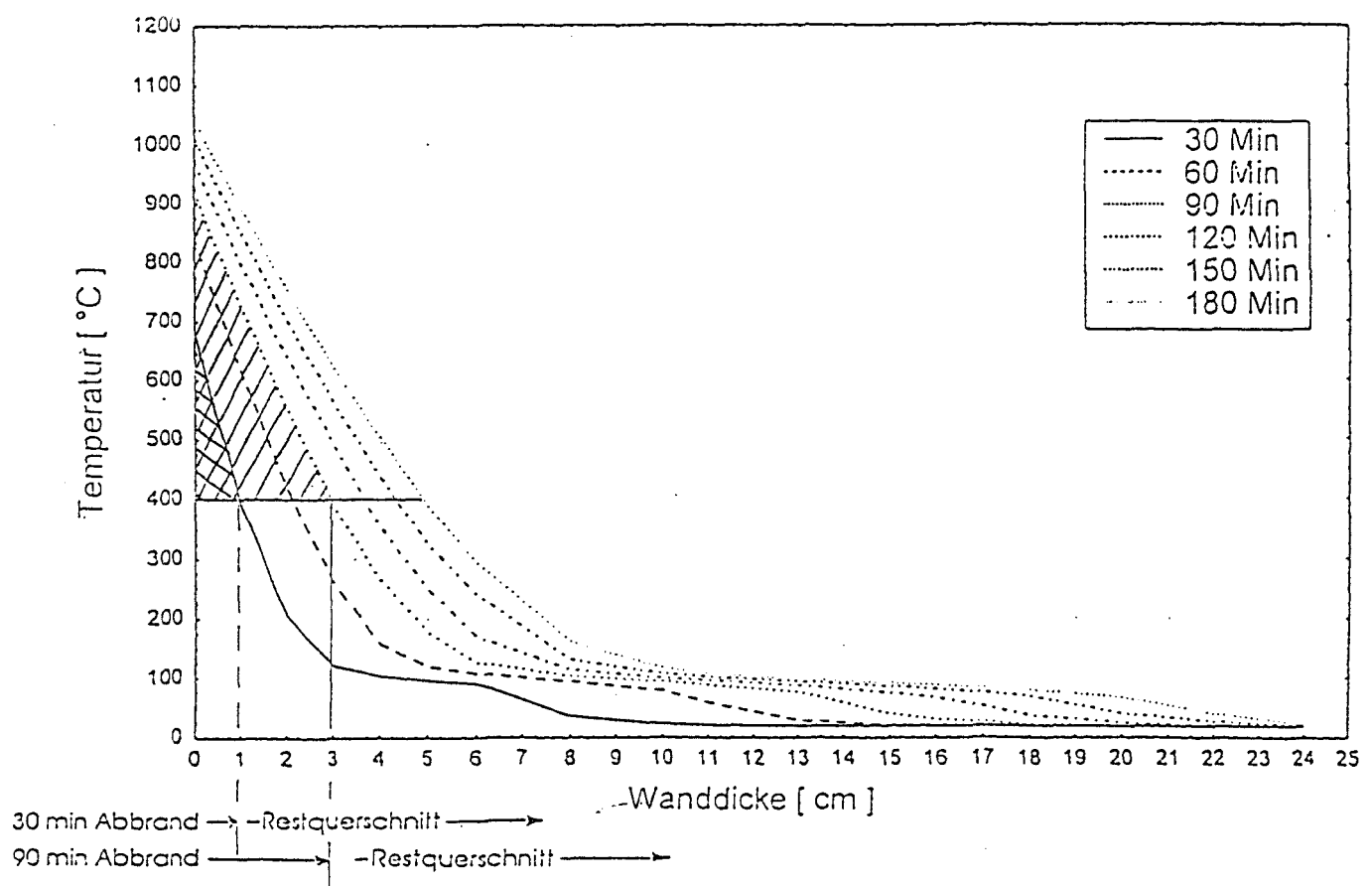


Bild 7.5: Temperaturverteilung (Rechenwerte) in Leichtbeton aus Bims in Abhängigkeit von der Bauteildicke und der Zeit sowie anzusetzende Abbrandrate

Es werden ebenfalls die Formeln (12, 13 und 14) zugrunde gelegt. Angaben zu den Einzelwerten und zu Rechenergebnissen sind [27] zu entnehmen.

### 7.3.5 Ziegel

Ebenso konnten aufbauend auf den Erkenntnissen der Modellbildung für Porenbeton entsprechend den vorstehenden Angaben auch für Ziegel erste Ansätze zum vereinfachten Rechenverfahren entwickelt werden. Die Grenzen der anzusetzenden Randbedingungen wurden entsprechend modifiziert. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß diese Werte nur für die bisher ausgesuchten Ziegelarten gelten können. Ziegel sind sehr unterschiedlich und lassen sich nicht verallgemeinernd zusammenfassen. Für die Temperaturen und die Abbrandraten ist das Bild 7.6 zugrunde zu legen.

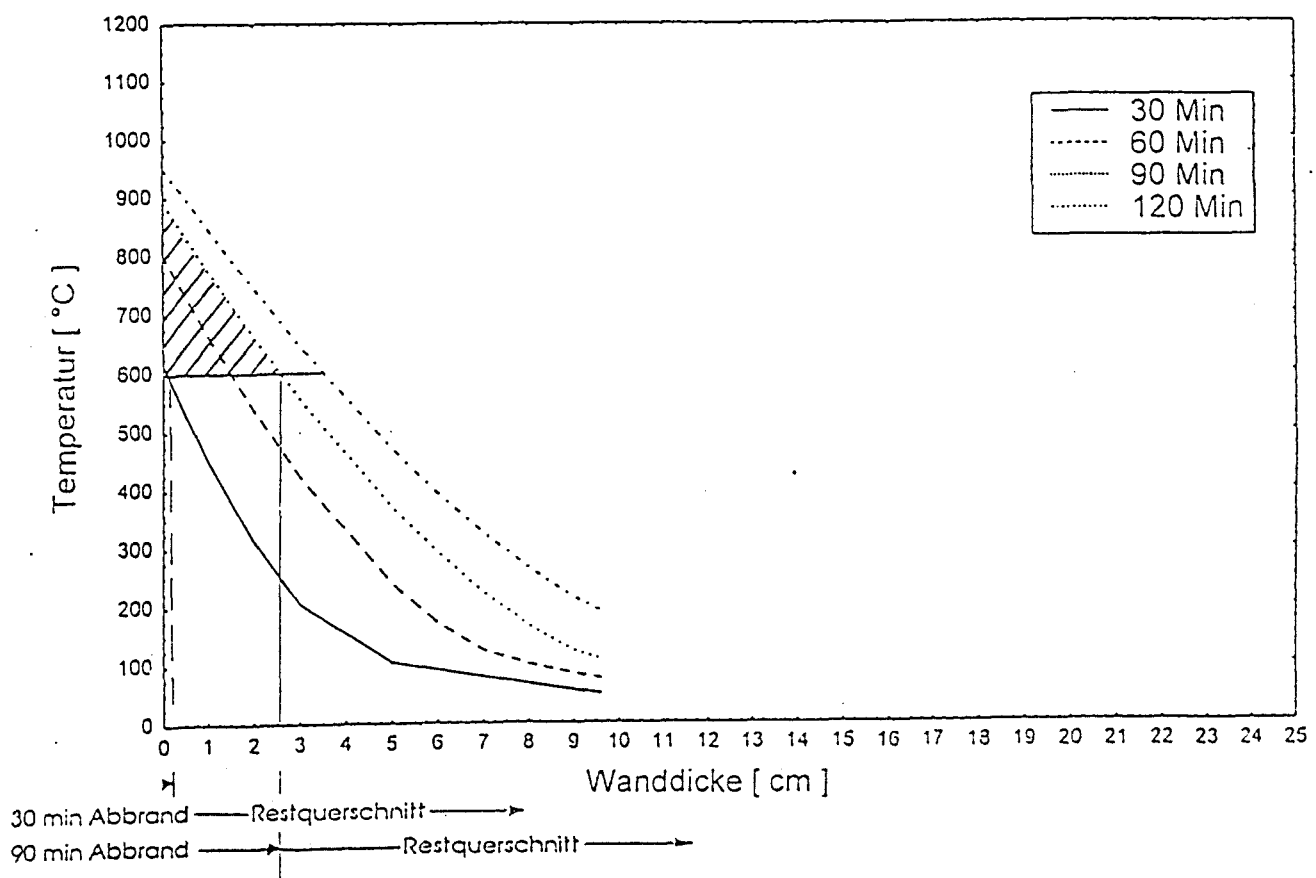


Bild 7.6: Temperaturverteilung (Rechenwerte) in Ziegel in Abhängigkeit von der Bauteildicke und der Zeit sowie anzusetzende Abbrandrate

Es wurden ebenfalls die Formeln (12, 13 und 14) zugrunde gelegt. Da jedoch fast keine Versuchswerte von ungeputzten Wänden und Pfeilern aus Ziegelmauerwerk vorliegen, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Die bisher ermittelten Rechenwerte sind nicht repräsentativ, weil der Einfluß von Putz bisher noch nicht berücksichtigt werden konnte. Weitere Erkenntnisse werden in [27] zusammengefaßt

Es muß nochmals darauf hingewiesen werden, daß die bisherigen Ergebnisse nur für einige exemplarisch ausgewählte Ziegel bisher anzuwenden sind. Besonderheiten von Ziegeln unter Brandbeanspruchung (z.B. Abplatzen bei ungünstigen Lochbildern) konnten bisher bei dem vereinfachten Rechenverfahren nicht berücksichtigt werden.

#### 7.4 Verifizierung des vereinfachten Rechenverfahrens

Im Bild 7.7 werden zum Nachweis der Verwendbarkeit des vereinfachten Rechenverfahrens einige berechnete und gemessene Versagenszeiten für verschiedene Mauerwerksarten nach Abschnitt 7.3 gegenübergestellt.

Man erkennt, daß die Abweichungen in der Regel im Rahmen üblicher Modellunsicherheiten von  $\pm 10 \%$  liegen. In zwei Fällen liegen Ergebnisse deutlich auf der unsicheren und in einem Fall deutlich auf der sicheren Seite.

Mit dem vereinfachten Rechenverfahren lassen sich keine genauen Berechnungen zur Ermittlung bestimmter Feuerwiderstandsdauern durchführen. Es kann jedoch durch einfache Berechnungen festgestellt werden, ob ein bestimmter, ausgewählter Pfeiler- oder Wandquerschnitt in eine bestimmte Feuerwiderstandsklasse einzuordnen ist. Damit wird das Ziel eines vereinfachten Rechenverfahrens erreicht.

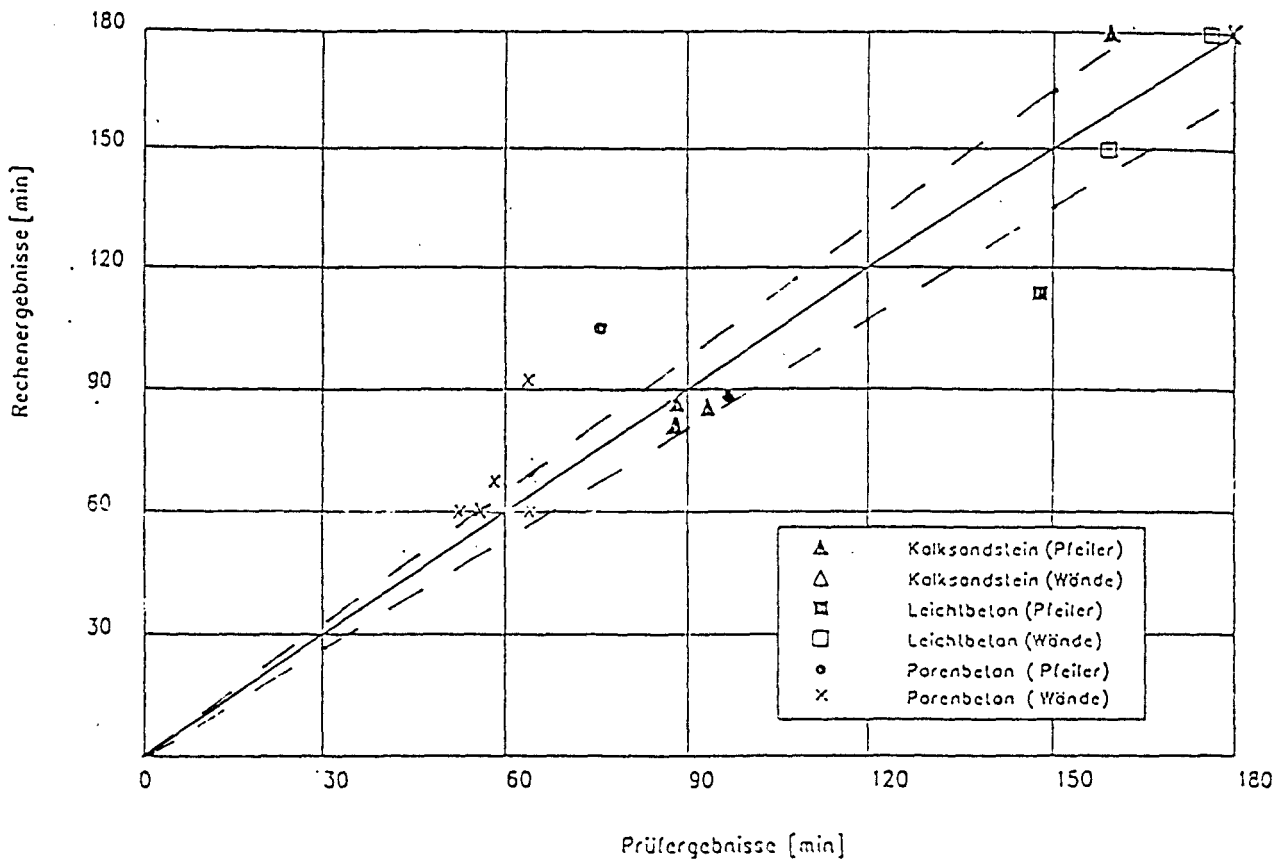


Bild 7.7: Vergleich gemessener und berechneter Versagenszeiten (Tragfähigkeit) von verschiedenen Mauerwerksarten gemäß Abschnitt 7.3 nach dem vereinfachten Rechenverfahren

## 7.5 Offene Probleme

Auch bei dem vereinfachten Rechenverfahren muß festgestellt werden, daß die Entwicklung des Verfahrens auf der Basis von Einzelergebnissen bezogen auf das Gesamtmauerwerk für einige typische, jedoch ausgewählte Mauerwerksarten durchgeführt wurde. Da mit dem vereinfachten Rechenverfahren nicht nur die brandschutztechnisch ungünstigste Mauerwerksart abgedeckt werden sollte, die dann alle Mauerwerksarten beinhaltet, mußte auch hier berücksichtigt werden, daß gewisse Randbedingun-

gen Mauerwerksspezifisch festgelegt werden mußten. Hiermit haben sich wiederum die vorliegenden Erfahrungen aus zahlreichen Bauteilprüfungen bestätigt, die bereits deutlich das unterschiedliche Brandverhalten der einzelnen Mauerwerksarten aufzeigten. Aufgrund der guten Beobachtungen und zahlreichen zusätzlich durchgeführten Messungen hinsichtlich der Temperaturentwicklung im Mauerwerk und hinsichtlich der Verformungen, die in Absprache mit den Mauerwerksindustrien erfolgte, konnte für die ausgewählten Mauerwerksarten ein vereinfachtes Rechenverfahren entwickelt werden. Auch hier muß gesagt werden, daß es aufgrund der vorliegenden Datenfülle in dem gesteckten Rahmen des Forschungsvorhabens nicht möglich war, für alle in der Baupraxis eingesetzten Mauerwerks - Materialien Rechenwerte zur Verfügung zu stellen.

Weitergehende experimentelle und rechnerische Untersuchungen sind vor einer Verallgemeinerung auf andere, als die untersuchten, Mauerwerksarten erforderlich. Hiermit sollte es möglich werden, daß vereinfachte Rechenverfahren zu modifizieren, so daß genauere Ergebnisse mit einem geringerem Sicherheitsabstand erreicht werden. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, welcher Genauigkeitsgrad von einem vereinfachten Rechenverfahren erreicht werden soll.

Für das vereinfachte Rechenverfahren sollte unabhängig von den o.a. Angaben jedoch noch folgenden offenen Problemen nachgegangen werden:

- Der Einfluß von Putz auf den Mauerwerks - Bauteilen auf die Feuerwiderstandsdauer sollte ermittelt und berücksichtigt werden. Hierzu liegen bisher keine Temperaturergebnisse aus Bauteilprüfungen vor, die als Grundlage verwendet werden könnten. Aufgrund der Beobachtungen könnten zur Zeit lediglich pauschale Werte zur Verlängerung der Feuerwiderstandsdauer angesetzt werden.

- Der Einfluß definierter Lochbilder wird bisher, ebenso wie beim allgemeinen Rechenverfahren, bei Lochsteinen nicht berücksichtigt. Der Lochanteil kann sich nach vorliegenden Prüferfahrungen bei einzelnen Steinarten und auch das Lochbild negativ auf das Brandverhalten auswirken. Bisher kann hierfür nur ein pauschaler Sicherheitszuschlag als Empfehlung in Rechnung gesetzt.





## 8 ZUSAMMENFASSUNG

### 8.1 Schlußfolgerungen und Bewertung der Rechenverfahren

#### 8.1.1 Allgemeines

Ein rechnerisches Nachweisverfahren zum Brandverhalten von Mauerwerk wurde in der Vergangenheit weder in Deutschland noch im europäischen Ausland entwickelt. Das Brandverhalten wurde ausschließlich durch Brandprüfungen an praxisgerecht erstellten Wänden und Pfeilern aus den verschiedenen Mauerwerksarten nachgewiesen bzw. konnte aufgrund mittlerweile zahlreicher vorliegender Prüferfahrungen gutachtlich beurteilt werden. Mit dieser Vorgehensweise war es jedoch nicht möglich, Prüfergebnisse und Prüfverfahren verschiedener Länder zu vergleichen oder auch Streuungen innerhalb der Versuchsergebnisse für eine Mauerwerksart zu erklären. Hier erwies es sich als besonders nachteilig, daß für Mauerwerk, im Gegensatz zu den anderen klassischen Konstruktionsbaustoffen, analytische Ansätze als Hilfsmittel zur Interpolation, Extrapolation und Interpretation von Versuchsergebnissen fehlen.

Im iBMB liegen seit den 70er Jahren vielfältige Erfahrungen mit der Entwicklung von Rechenverfahren zum Nachweis des Brandverhaltens von Stahlbeton-, Stahl-, Verbund-, und Holzkonstruktionen vor. Diese dienen als Grundlage für die Entwicklung rechnerischer Nachweisverfahren zum Brandverhalten von Mauerwerkskonstruktionen.

Aufgrund der in Abschnitt 4 beschriebenen Materialuntersuchungen an Mauersteinen und Mörteln werden zunächst temperaturabhängige mechanische Materialkennwerte für die einzelnen Mauerwerksarten als Synthese aus den Ergebnissen von stationären  $\sigma$ - $\epsilon$ -Versuchen mit konstanter Temperatur und sog. Warmkriechversuchen mit instationärer Erwärmung unter konstanter Last ermittelt. Die temperaturabhängigen  $\sigma$ - $\epsilon$ -Rechenfunktionen verknüpfen die geringeren Steifigkeiten aus Warmkriechversuchen mit den Festigkeitsamplituden der stationären Versuche

sowie einem fiktiven abfallenden Ast - in Anlehnung an die Vorgaben in den Eurocodes 2 bis 4, Teile 1-2.

Für jede Stein- und Mörtelart ergeben sich andere Verhältnisse. Bei Porenbeton und Kalksandstein nehmen z.B. bis zu Temperaturen von etwa 500 °C die Festigkeitswerte zu, bei Bimsbeton, Ziegeln und allen Mörteln verringern sie sich kontinuierlich mit zunehmender Erwärmung.

Für die thermische Analyse von Bauteilquerschnitten bei ein- und mehrseitiger Brandbeanspruchung werden für die verschiedenen Stein- und Mörtelarten die wärmetechnischen Kennwerte - Dichte  $\rho$ , spezifische Wärmekapazität  $c_p$  und Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  - jeweils in Abhängigkeit der Temperatur bereitgestellt. Die entsprechenden Rechenfunktionen wurden in Anlehnung an Vorgaben für Beton aus vergleichenden Analysen von berechneten und gemessenen Bauteiltemperaturen bei Normbrandversuchen bestimmt.

Zur Überprüfung, inwieweit mit den Materialkennwerten der Einzelkomponenten Mauerstein und Mörtel das Trag- und Verformungsverhalten von Mauerwerk zutreffend wiedergegeben werden kann, werden im Abschnitt 5 Versuchsergebnisse von Mauerwerksabschnitten (sog. RILEM-Körpern) herangezogen.

#### 8.1.2 Allgemeines rechnerisches Nachweisverfahren

Das in Abschnitt 6 vorgestellte allgemeine rechnerische Nachweisverfahren basiert auf den in Abschnitt 4 ermittelten thermo-mechanischen und wärmetechnischen Materialkennwerten für die einzelnen Baustoffe. Im ersten Schritt wird eine thermische Querschnittsanalyse mit Hilfe des Unterprogramms FIRES-T durchgeführt. Für beliebige Querschnittsformen sowie ein- oder mehrseitige Brandbeanspruchung kann die Temperaturverteilung innerhalb des Querschnittes errechnet und z. B. in Form von Isothermenbildern anschaulich dargestellt werden. Bei den exemplarisch untersuchten Wänden und Pfeilern wird

eine gute Übereinstimmung der berechneten und der im Versuch gemessenen Temperaturen erzielt.

Im zweiten Schritt erfolgt die mechanische Bauteilanalyse. Hierzu wurden die temperaturabhängigen  $\sigma$ - $\epsilon$ -Rechenfunktionen in das Rechenprogramm STABA-F (Stabförmige Bauteile im Feuer) implementiert. Um die stark unterschiedliche Temperaturabhängigkeit der verschiedenen Steinarten konsistent erfassen zu können, mußten umfangreiche Programmmodifikationen vorgenommen und ausgetestet werden. Anhand umfangreicher Parameterstudien wurde dann untersucht, wie das Zusammenwirken von Steinen und Mörtel das Tragverhalten brandbeanspruchter Mauerwerksbauteile beeinflußt. Inwieweit sich die für ausgewählte Mauerwerkskonstruktionen erzielten Ergebnisse auf die übrigen Mauerwerksarten verallgemeinern lassen, kann derzeit noch nicht abschließend beurteilt werden. Hierzu sind weitergehende rechnerische Untersuchungen und Vergleiche mit Versuchen notwendig.

#### 8.1.3 Vereinfachtes rechnerisches Nachweisverfahren

Neben dem allgemeinen rechnerischen Nachweisverfahren wird auch ein vereinfachtes Nachweisverfahren vorgestellt. Es basiert auf den in Diagrammen zusammengefaßten Querschnittstemperaturen für definierte Normbranddauern, die für unterschiedliche Querschnitte bzw. Wanddicken und Mauersteinarten berechnet wurden. Anhand von Grenztemperaturen werden brandreduzierte Querschnitte festgelegt, denen bestimmte Festigkeiten zugeordnet werden. Damit kann dann nach dem Traglastverfahren die Tragfähigkeit nach definierter Branddauer berechnet und mit der vorhandenen (vorwiegend zentrischen) Belastung verglichen werden. Es kann für die ausgewählten Mauerwerksarten gezeigt werden, daß mit diesem vereinfachten Verfahren eine auf der sicheren Seite liegende brandschutztechnische Bemessung möglich ist.

## 8.2 Empfehlungen zur Umsetzung in die Praxis sowie weiteres Vorgehen

Es wird empfohlen, sowohl das allgemeine rechnerische Nachweisverfahren als auch das vereinfachte rechnerische Nachweisverfahren von deutscher Seite mittelfristig zur Aufnahme in den Eurocode 6 Teil 1-2 als Nachweisverfahren der Stufe III bzw. Stufe II vorzuschlagen und so die derzeitige Beschränkung auf Nachweise der Stufe I (Bemessungstabellen) zu überwinden.

Die auf der Basis von Versuchsdaten aus mehreren Parallelvorhaben hergeleiteten temperaturabhängigen Materialkennwerte konnten im Rahmen dieses Vorhabens jedoch nur exemplarisch auf ausgewählte Mauerwerksbauteile aus Porenbeton und Kalksandstein angewendet und anhand von Versuchsnachrechnungen abgesichert werden. Vor einer Verallgemeinerung auf andere Mauersteinarten sind weitergehende experimentelle und rechnerische Untersuchungen erforderlich, um das sehr unterschiedliche Hochtemperaturverhalten der verschiedenen Mauerwerksarten hinreichend realistisch und zuverlässig beschreiben zu können.

Insbesondere ist den nachfolgend umrissenen Fragestellungen nachzugehen:

- Bisher liegen keine Untersuchungen zum biaxialen Verhalten von Mauerwerk bei hohen Temperaturen vor, da nur einaxiale Untersuchungen durchgeführt wurden. Der Einfluß mehraxialer Belastung auf die Festigkeit wurde näherungsweise durch Korrekturfaktoren in Anlehnung an Erkenntnisse für Beton abgeschätzt.

Bei Kenntnis des biaxialen Verhaltens lassen sich spezielle Beanspruchungszustände im Fugenbereich oder bei Lochsteinen besser erklären und erfassen.

- Bisher wird der Einfluß definierter Lochbilder bei Lochsteinen nicht berücksichtigt, obwohl sich Lochanteile nach vorliegenden Prüferfahrungen negativ auf das Brandverhalten auswirken. Dem kann lediglich durch eine pauschale Querschnittsreduktion bzw. einen entsprechenden Sicherheitszuschlag näherungsweise Rechnung getragen werden.
- Die Wirkung verschiedener Rohstoffzusammensetzung der Steinarten und Mörtelsorten bleibt bei der Modellbildung unberücksichtigt. Deshalb sind die Rechenannahmen strenggenommen für jede geänderte Zusammensetzung neu zu kalibrieren, sofern die systematischen Abhängigkeiten nicht im Detail bekannt sind.
- Der Einfluß der Feuchte wird näherungsweise bis zur Ausgleichsfeuchte rechnerisch berücksichtigt. Die Auswirkung auf das Abplatzverhalten wird jedoch derzeit nur qualitativ aufgrund von Prüferfahrungen an Bauteilen und Literaturangaben abgeschätzt. Spezielle Untersuchungen hierzu liegen nicht vor.

Insgesamt können die entwickelten Nachweisverfahren, trotz der o. g. Einschränkungen und Anwendungsgrenzen, wertvolle Dienste bei der Erweiterung des Wissensstandes bezüglich des Brandverhaltens von Mauerwerk sowie bei der gezielten Optimierung von Mauerwerkskonstruktionen leisten.

Bestehende Lücken und fehlende Absicherungen bei den Rechenannahmen sowie notwendige Vereinfachungen bei der Modellierung lassen sich durch weiterführende experimentelle und rechnerische Untersuchungen mit begrenztem Aufwand beseitigen.



## LITERATUR

- [1] Mann, W.: Ingenieurmäßige Bemessung von Mauerwerk nach DIN 1053, Teil 2 und Auswirkungen auf die Mauerwerksnormung; Mauerwerk-Kalender 1986
- [2] Mann, W.: Druckfestigkeit von Mauerwerk - Eine statistische Auswertung von Versuchsergebnissen in geschlossener Darstellung mit Hilfe von Potenzfunktionen; Mauerwerk-Kalender 1983
- [3] Schulenberg, W.: Theoretische Untersuchungen zum Tragverhalten von zentrisch gedrückten Mauerwerk aus künstlichen Steinen unter besonderer Berücksichtigung der Qualität der Lagerfuge; Dissertation Darmstadt 1982
- [4] Schubert, P.: E-Moduln von Mauerwerk in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des Mauerwerks, der Mauersteine und des Mauermörtels; Mauerwerk-Kalender 1985
- [5] Mann, W., Müller, H.: Schubtragfähigkeit von Mauerwerk; Mauerwerk-Kalender 1978 und 1985
- [6] Funk, P.: Berechnungshilfen für die Bemessung von Mauerwerk nach DIN 1053 Teil 1 und Teil 2; Mauerwerk-Kalender 1991
- [7] Schubert, P., Meyer, U.: Harmonisierung europäischer Baubestimmungen - Eurocode 6 Mauerwerksbau; Ermittlung von charakteristischen Spannungs-Dehnungs-Linien von Mauerwerk; Abschlußbericht F 330 des Instituts für Bauforschung, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dez. 1990
- [8] Achtziger, J.: Meßergebnisse der Wärmeleitfähigkeit von verschiedenen Mauerwerksarten unter Normaltemperatur; Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. , München

- [9] Mann, W.: Grundlagen der Bemessung gemauerter Wände unter vertikaler Belastung nach Eurocode 6 unter Berücksichtigung der Knickgefahr und Vergleich mit Versuchsergebnissen; Mauerwerk-Kalender 1992
- [10] Haksever, A., Schneider, U.: Hochtemperaturverhalten von Bauteilen aus Konstruktionsleichtbeton, Arbeitsbericht 1978 - 1980, Teil 1, SFB 148, Braunschweig 1980
- [11] Dhanasekar, M., Chandrasekaran, V., Grubits, S.J.: A numerical model for thermal bowing of masonry walls; Australia, 10th International Brick/Block Masonry Conference, Canada 1994
- [12] Schubert, P.: Eigenschaftswerte von Mauerwerk, Mauersteinen und Mauermörtel, Mauerwerk-Kalender 1996
- [13] Hahn, Chr., Hosser, D.: Zur Ermittlung der Materialeigenschaften von Kalksandsteinen in Verbindung mit Mörtel nach DIN 1053 unter Hochtemperaturbeanspruchung als Grundlage für brandschutztechnische Nachweise, Forschungsbericht Nr. 9101/6702, iBMB 09/95
- [14] Hahn, Chr., Hosser, D.: Zur Ermittlung der Materialeigenschaften von Porenbeton in Verbindung mit Mörtel nach DIN 1053 unter Hochtemperaturbeanspruchung als Grundlage für brandschutztechnische Nachweise, Forschungsbericht Nr. 9017/6317, iBMB 11/95
- [15] Hahn, Chr., Hosser, D.: Zur Ermittlung der Materialeigenschaften von Leichtbeton aus Naturbims in Verbindung mit Mörtel nach DIN 1053 unter Hochtemperaturbeanspruchung als Grundlage für brandschutztechnische Nachweise, Forschungsbericht Nr. 9018/6318, iBMB 11/95



- [16] Hahn, Chr., Hosser, D.: Zur Ermittlung der Materialeigenschaften von Mauerziegeln in Verbindung mit Mörtel nach DIN 1053 unter Hochtemperaturbeanspruchung als Grundlage für brandschutztechnische Nachweise, Forschungsbericht Nr. 9115/6733, iBMB 04/96
  
- [17] Kordina, K., Hahn, Chr.: Ermittlung des Brandverhaltens von Mauerwerkswänden nach DIN 1053 Teil 2 (Rezeptmauerwerk) im Bereich von hochfesten Steinen bei einer vierseitigen Brandbeanspruchung nach DIN 4102, Forschungsmittel des IfBt, iBMB 1989
  
- [18] Steinert, C.: Bestimmung der Wärmeübergangsbedingungen auf Bauteile im Brandfall; Abschlußbericht iBMB
  
- [19] Becker, J., Bizri, H., Bresler, B.: FIRES- T, A computer program for the fire response of structures-thermal; University of California, Berkeley 01/74
  
- [20] Haß, R.: Zur praxisgerechten brandschutztechnischen Beurteilung von Stützen aus Stahl und Beton, Dissertation 1985, TU Braunschweig
  
- [21] Richter, E.: Spannungs/Dehnungs-Linien zur Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens von Konstruktionsbauteilen unter Feuerangriff, Arbeitsbericht 1984 - 1986, Teil I, Band A, SFB 148, Braunschweig 1987
  
- [22] Schlüter, H.-J.: STABA-F; Ein Programmsystem zur Berechnung des Verhaltens stabförmiger Bauteile im Feuer; Programmhandbuch, iBMB 1991
  
- [23] Thienel, K.-Chr.: Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung - Versuche und Modellbildung; Dissertation 1993, Heft 104 iBMB, Braunschweig

- [24] Hosser, D., Dorn, T., El-Nesr, O.: Vereinfachtes Rechenverfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Verbundstützen aus kammerbetonierten Stahlprofilen; Stahlbau, Teil 1 Heft 3 (94), Teil 2 Heft 4 (94)
  
- [25] El-Nesr, O.: Vereinfachtes Rechenverfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Verbundstützen aus betongefüllten runden Stahl-Hohlprofilen; Bautechnik, Heft 11 (94)
  
- [26] Diederichs, U., Hahn, Chr.: Ermittlung der Hochtemperatureigenschaften von Mauerwerk und Mauerwerkbaustoffen; Forschungsmittel des Landes Niedersachsen, iBMB 1988
  
- [27] Hahn, Chr.: Beitrag zur Entwicklung von vereinfachten und allgemeinen Rechenverfahren zum Brandverhalten von Mauerwerk unter Berücksichtigung des Baustoffverhaltens (Arbeitstitel in Vorbereitung)

## NORMEN und RICHTLINIEN

- [N1] Eurocode 6      Bemessung und Konstruktion von Mauerwerk  
      (ENV 1996)      Teil 1.1: Entwurf, Berechnung und Bemessung  
                              von Tragwerken aus Mauerwerk  
                              Teil 1.2: Allgemeine Regeln - Tragwerks-  
  bemessung für den Brandfall
- [N2] DIN 1053      Mauerwerk;  
                      Teil 1:    Rezeptmauerwerk; Berechnung und  
  Ausführung (02/90)
- [N3]                Teil 2:    Mauerwerk nach Eignungsprüfung;  
  Berechnung und Ausführung (07/84)
- [N4]                Teil 3:    Bewehrtes Mauerwerk; Berechnung  
  und Ausführung (02/90)
- [N5] DIN 105      Mauerziegel;  
                      Teil 1:    Vollziegel und Hochlochziegel  
  (08/89)  
                      Teil 2:    Leichthochlochziegel (08/89)  
                      Teil 3:    Hochfeste Ziegel und hochfeste  
  Klinker (05/84)  
                      Teil 4:    Keramiklinker (05/84)  
                      Teil 5:    Leichtlanglochziegel und Leicht-  
  langloch-Ziegelplatten (05/84)
- [N6] DIN 106      Kalksandstein;  
                      Teil 1:    Vollsteine, Lochsteine, Block-  
  steine, Hohlblocksteine (09/80)  
                      Teil 2:    Vormauersteine und Verblender  
  (11/80)
- [N7] DIN 4165      Gasbeton-Blocksteine und Gasbeton-  
                              Plansteine (12/86)  
                      A2:        Porenbeton-Blocksteine und  
  Porenbeton-Plansteine (02/94)

- [N8] DIN 18151           Hohlblöcke aus Leichtbeton (09/87)
- [N9] DIN 18152           Vollsteine und Vollblöcke aus Leichtbeton  
                          (04/87)
- [N10] DIN 18153           Mauersteine aus Beton (Normalbeton) (09/89)
- [N11] DIN 4102           Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen  
Teil 2:   Bauteile; Begriffe, Anforderungen  
                          und Prüfungen (09/77)
- [N12]                    Teil 3:   Brandwände und nichttragende Außenwände; Begriffe, Anforderungen  
                          und Prüfungen (09/77)
- [N13]                    Teil 4:   Zusammenstellung und Anwendung  
                          klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile (03/94)
- [N14] DIN 4108           Wärmeschutz im Hochbau;
- [N15] DIN 4103           Nichttragende innere Trennwände;  
Teil 1:   Anforderungen, Nachweise (07/84)
- [N16] DIN 18554           Prüfung von Mauerwerk;  
Teil 1:   Ermittlung der Druckfestigkeit  
                          und des Elastizitätsmoduls  
                          (12/85)
- [N17] Eurocode 1           Grundlagen des Entwurfs, der Berechnung  
(ENV 1991-2-2)           und der Bemessung sowie Einwirkungen auf  
                          Tragwerke;  
Teil 2-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke  
                          (Vornorm 1995, Deutsche Übersetzung 1997)
- [N18] DIN 18555           Prüfung von Mörteln mit mineralischem  
                          Bindemittel; Teile 1 - 8

[N19]                      Vorläufige Richtlinie zur Ergänzung der  
                             Eignungsprüfung von Mauermörtel -  
                             Druckfestigkeit in der Lagerfuge -  
                             Anforderungen, Prüfung; 03/90

## FORMELZEICHEN

$\sigma_z$	=	Zugspannung parallel zur Lagerfuge im Gebrauchszustand
$\sigma_d$	=	gleichzeitig wirkende Druckspannung parallel zur Lagerfuge
$\beta_{Rz}$	=	Rechenwert der Steinzugfestigkeit nach Tabelle 2
$\beta_{Rk}$	=	Rechenwert der Kohäsion nach Tabelle 3, Kohäsion ist nur anzusetzen, wenn die Fuge nicht klafft.
$\mu$	=	Reibungsbeiwert = 0,6
$\ddot{u}/h$	=	Überbindemaß / Steinhöhe
$\gamma$	=	Sicherheitsbeiwert

## ANLAGENVERZEICHNIS

### Anlage 1

#### Zusammenfassung der vorliegenden Prüfergebnisse

Tabelle 1	Porenbeton
Tabelle 2	Kalksandstein
Tabelle 3	Leichtbeton
Tabelle 4	Betonstein
Tabelle 5	Ziegel

### Anlage 2

#### Lage der Meßstellen in den Bauteil-Probekörpern

2.1	Pfeiler
2.2	Wände
2.3	Wandabschnitte

### Anlage 3

#### Mechanische Analyse Einzel-Baustoffe

3.1	Prüfmaschine
3.2.1 - 3.2.4	untersuchte Steinformate
3.3.1 - 3.3.10	Versuchsübersichten zu den einzelnen Baustoffen
3.4.1 - 3.4.4	Zusammenfassung der $\sigma$ - $\epsilon$ Versuche und Warmkriechversuche mit Porenbeton
3.5.1 - 3.5.4	Zusammenfassung der $\sigma$ - $\epsilon$ Versuche und Warmkriechversuche mit Kalksandstein
3.6.1 - 3.6.4	Zusammenfassung der $\sigma$ - $\epsilon$ Versuche und Warmkriechversuche mit Leichtbeton aus Bims
3.7.1 - 3.7.4	Zusammenfassung der $\sigma$ - $\epsilon$ Versuche und Warmkriechversuche mit Ziegel
3.8.1 - 3.8.4	Zusammenfassung der $\sigma$ - $\epsilon$ Versuche und Warmkriechversuche mit Leichtmörtel

3.9.1 - 3.9.2 Zusammenfassung der  $\sigma$ - $\epsilon$  Versuche und Warmkriechversuche mit Normalmörtel

Anlage 4

Mechanische Analyse Mauerwerksabschnitte (RILEM-Körper)

- 4.1 Prüfmaschine
- 4.2 Lage der Wegaufnehmer
- 4.3 Lage der Temperaturmeßstellen
- 4.4.1 - 4.4.4 Versuchsübersicht zu den Mauerwerks-Probe-körpern

Anlage 5

Thermische Analyse

- 5.1.1 - 5.1.59 Porenbeton: Ermittlung der thermischen Materialwerte, Berechnungen, Isothermen, Vergleich mit Meßwerten
- 5.2.1 - 5.2.62 Kalksandstein: Ermittlungen der thermischen Materialwerte, Berechnungen, Isothermen, Vergleich mit Meßwerten
- 5.3.1 - 5.3.25 Leichtbeton aus Bims: Ermittlungen der thermischen Materialwerte, Berechnungen, Isothermen, Vergleich mit Meßwerten
- 5.4.1 - 5.4.67 Ziegel: Ermittlungen der thermischen Materialwerte, Berechnungen, Isothermen, Vergleich mit Meßwerten



17. Juni 1998

30-0424/001